

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

ANNEE 1961

THÈSE

N°

672

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

DIPLOME D'ETAT

par

Raymond SIBILLE

né le 5 Avril 1924 à CONSTANTINE (Algérie)

Présentée et soutenue publiquement le : 13 Juin 1961

APERCU DES PROBLEMES

QUE POSE LA PROTECTION DES COLLECTIVITES CONTRE
LES DOMMAGES POSSIBLES DES RADIATIONS IONISANTES DISSIPÉES
PAR L'EXPLOITATION PACIFIQUE DE L'ENERGIE NUCLEAIRE

Président : Monsieur DEPARIS, Professeur.

ÉDITIONS A. G. E. M. P. — 8, RUE DANTE . PARIS-V°

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

ANNEE 1961

N°

THÈSE

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

DIPLOME D'ÉTAT

par

Raymond SIBILLE

né le 5 Avril 1924 à CONSTANTINE (Algérie)

Présentée et soutenue publiquement le : 13 Juin 1961

APERCU DES PROBLEMES
QUE POSE LA PROTECTION DES COLLECTIVITES CONTRE
LES DOMMAGES POSSIBLES DES RADIATIONS IONISANTES DISSIPÉES
PAR L'EXPLOITATION PACIFIQUE DE L'ÉNERGIE NUCLEAIRE

Président : Monsieur DEPARIS, Professeur.

ÉDITIONS A. G. E. M. P. — 8, RUE DANTE . PARIS-V°



FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

PROFESSEURS

1-10-1960

PROFESSEURS HONORAIRES :

MM. Aubin (A.), Bénard (H.), Bulliard (H.), Cadenat (F.), Chabrol (E.), Champy (C.), Debré (R.), Gastinel (P.), Guillaïn (G.), Halphen (E.), Hazard (R.), Heuyer (G.), Lantuejoul (P.), Laroche (G.), Lévy-Solal (E.), Lian (C.), Loeper (M.), Marion (G.), Mathieu (P.), Mocquot (P.), Mondor (H.), Monod (R.), Moreau (R.), Olivier (E.), Pasteur Vallery-Radot, Petit-Dutaillis, Richet (C.), Strohl (A.), Tanon (L.).

DOYEN Léon BINET.

Membre de l'Institut

ASSEESSEUR. Jean VERNE.

I. — PROFESSEURS

	MM.
Anatomie.	DELMAS (A.)
Anatomie pathologique	DELARUE (J.)
Anesthésiologie.	BAUMANN (J.)
Biochimie médicale.	JAYLE (M. F.)
» » (Prof: à titre personnel)	ETTORI (J.)
» » (Prof: à titre personnel)	SCHAPIRA (G.)
Biologie appliquée à l'Education physique et aux Sports	CHAILLEY-BERT (P.)
Biologie médicale.	FAUVERT (R.)
» » (Prof: à titre personnel)	BOURLIERE (F.)
Cancérologie médicale et sociale	BERNARD (J.)
Clinique carcinologique chirurgicale (Necker)	REDON (H.)
Clinique cardiologique (Broussais)	MOUQUIN (M.)
Beaujon	SICARD (A.)
Cochin	N.
Hôtel-Dieu	PATEL (J.)
Pitié	CORDIER (G.)
Saint-Antoine	GOSSET (J.)
Salpêtrière	MOULONGUET (P.)
Tanon	LORTAT-JACOB (J.-L.)
Clinique de chirurgie infantile et orthopédique (Enfants-Malades)	FÈVRE (M.)
Clinique chirurgicale orthopédique et réparatrice (Cochin)	MERLE D'AUBIGNÉ (R.)
Clinique de chirurgie cardio-vasculaire (Broussais)	GAUDART-D'ALLAINES (F. de)
Clinique de chirurgie pleuro-pulmonaire (Laënnec)	MATHEY (J.)
Clinique endocrinologique (Pitié)	DECOURT (J.)
Clinique de génétique médicale (Enfants-Malades)	LAMY (M.)
Clinique gynécologique (Broca)	FUNCK-BRENTANO (P.)
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques (St-Louis)	DEGOS (R.)
Clinique des maladies des enfants (Enfants-Malades)	CATHALA (J.)
Clinique des maladies infectieuses (Claude-Bernard)	MOLLARET (P.)
Clinique des maladies mentales et de l'encéphale (Ste-Anne)	DELAY (J.)
Clinique des maladies métaboliques (Necker)	HAMBURGER (J.)
Clinique des maladies du sang (Broussais)	MARCHAL (G.)
Clinique des maladies du système nerveux (Salpêtrière)	N.
Bouicaud	LENÈGRE (J.)
Broussais	SOULIÉ (P.)
Cochin	JUSTIN-BESANÇON (L.)
Cochin	BROUET (G.)
Hôtel-Dieu	BARIÉTY (M.)
Pitié	DREYFUS (G.)
St-Antoine	KOURILSKY (R.)
Clinique médicale d'hydrologie thérapeutique et climatologie (Bichat)	DEBRAY (C.)
Clinique médicale propédeutique (Broussais)	GENNES (L. de)
Clinique médico-sociale du diabète sucré et des maladies de la nutrition (Hôtel-Dieu)	DEROT (M.)
Clinique de neuro-chirurgie (Pitié)	DAVID (M.)
Clinique neurologique (Salpêtrière)	GARCIN (R.)
Cliniques obstétricales	LACOMME (M.)
Baudelocque	MERGER (R.)
Foch (Suresnes)	VARANGOT (J.)
Clinique obstétricale et gynécologique (Port-Royal)	RENARD (G.)
Clinique ophtalmologique (Hôtel-Dieu)	AUBRY (M.)
Clinique oto-rhino-laryngologique (Lariboisière)	LELONG (M.)
Clinique de pédiatrie et de puériculture (St-Vincent-de-Paul)	MARIE (J.)
Clinique de pédiatrie Sociale (Enfants-Malades)	BERNARD (E.)
Clinique de pneumo-phthisiologie (Laënnec)	MICHAUX (L.)
Clinique psychiatrique infantile (Salpêtrière)	GOSTE (F.)
Clinique de rhumatologie médicale et sociale (Cochin)	DECHAUME (M.)
Clinique stomatologique (Pitié)	N.
Clinique thérapeutique chirurgicale (Vaugirard)	LEMAIRE (A.)
Clinique thérapeutique médicale (St-Antoine)	N.
Clinique urologique (Cochin)	GIROUD (A.)
Embryologie.	TUCHMANN-DUPLESSIS (H.)
» » (Prof: à titre personnel)	SÈZE (S. de)
Histoire de la médecine et de la chirurgie (Lariboisière)	VERNE (J.)
Histologie	

Hygiène et clinique de la première enfance (Trousseau)	MM.	TURPIN (R.)
Hygiène et médecine préventive		JOANNON (P.)
» » (Prof ^r à titre personnel)		DEPARIS (M.)
Médecine du Travail		DESOILLE (H.)
Médecine légale		PIÉDELIEVRE (R.)
Microbiologie (Bactériologie et virologie)		FASQUELLE (R.)
Parasitologie		GALLIARD (H.)
» (Prof ^r à titre personnel)		BRUMPT (L. C.)
Pathologie chirurgicale		COUVELAIRE (R.)
» » (Prof ^r à titre personnel)		LAURENCE (G.)
Pathologie exotique		LAVIER (G.)
Pathologie expérimentale et comparée		MERKLEN (F.-P.)
Pathologie médicale		MILLIEZ (P.)
Pathologie respiratoire		TURIAF (F.)
Pathologie et thérapeutique générales		BOUDIN (G.)
Pharmacologie		CHEYMOL (J.)
» (Prof ^r à titre personnel)		LÉVY (Mlle J.)
Physiologie		BINET (L.)
» (Prof ^r à titre personnel)		BARGETON (D.)
» » » »		PARROT (J.)
Physiologie et pathologie obstétricale		LEPAGE (F.)
Physique médicale		DOGNON (A.)
» » (Prof ^r à titre personnel)		DJOURNO (A.)
Radiologie médicale		DESGREZ (H.)
Technique chirurgicale et Chirurgie expérimentale		LÉGER (L.)
Thérapeutique		CONTE (M.)

II. — PROFESSEURS SANS CHAIRE, PROFESSEURS AGRÉGÉS ET MAÎTRES DE CONFÉRENCES - AGRÉGÉS

MM.		MM.	
Anatomie	{ CABROL (G.) COUINAUD (G.) OLIVIER (G.)	Ophtalmologie	{ BRÉGEAT (P.) SARAUX (H.)
Anatomie pathologique	{ GAUTHIER-VILLARS (Mlle P.) pr. s. ch. BUSSER (F.) GOUYGOU (Ch.) ORCEL (L.) PAILLAS (J.)	Orthopédie	{ JUDET (R.) RAMADIER (J.)
Anesthésiologie	{ VOUREH (G.)	Oto-rhino-Laryngologie	{ DEBAIN (J.)
Bactériologie	{ BARBIER (P.) CHRISTOL (D.) TOURNIER (P.)	Parasitologie	{ CHABAUD (A.)
Biochimie médicale	{ DESGREZ (P.), pr. s. ch. POLJANSKI (J.), m. conf.		{ BARGAT (J.) BINET (J.-P.) CAUCHOIX (J.) CHATELIN (C.-L.) DUBOST (Ch.) DUBOST (Cl.) FAUREL (J.)
Biologie appliquée à l'Éducation Physique et aux Sports	{ PLAS (F.)	Pathologie chirurgicale	{ FLABEAU (F.) GERMAIN (A.) LOYGUE (J.) MERCADIER PERROTIN (J.) ROBERT (H.) THOMERET (G.)
Carcinologie	{ DENOIX (P.) MATHE (G.)	Pathologie exotique	{ SCHNEIDER (J.)
Dermato-Syphiligraphie	{ DUPERRAT (B.)	Pathologie expérimentale	{ CROSNIER (J.) HARTMANN (L.) LEPER (J.) MAURICE (J.) RICHEL (G.)
Electro-Radiologie	{ LEDOUX-LEBARD (G.)		{ AUSSANNAIRE (M.) BOUR (H.) BOUVIER (J.) BOUVRAIN (Y.) BRICAIRE (H.) BRISAUD (H.) BROCARD (H.) BUGE (A.) CASTAIGNE (P.), m. conf. CATINAT (J.) CONTAMIN (F.) COURY (G.) FREZAL (J.) HOUSSET (E.) LAROCHÉ (Ch.) LESOBRE (R.) MACREZ (O.) NICK (J.) PEQUIGNOT (H.), pr. s. ch. ROYER (P.) WOLFROMM (R.)
Hématologie	{ BILSKI-PASQUIER (G.) DAUSSET (J.)		
Histologie	{ COUJARD (R.), pr. s. ch. MAROIS (M.) RACADOT (J.)		
Hydrologie	{ CORNET (A.)		
Hygiène	{ BOYER (J.), pr. s. ch. CORRE-HURST (Mme L.)		
Maladies infectieuses	{ BASTIN (R.) DUPONT (V.)		
Médecine légale	{ DEROBERT (L.), pr. s. ch. HADENGUE (A.) FOURNIER (E.) GUENIOT (M.)		
Médecine du travail	{ ALBAHARY (G.)		
Neurologie	{ LHERMITTE (F.) GRANJON (A.) HERVET (E.) LE LORIER (G.)		
Obstétrique	{ MORIN (P.) MUSSET (R.) ROBEY (M.) THOYER-ROZAT (J.)		

	MM.		MM.
Pédiatrie-Puériculture . . .	JOSEPH (R.)	Pneumo phtisiologie . . .	KREIS (B.)
	MANDE (R.)	Psychiatrie	PICHOT (P.)
	MOZZICONACCI (P.)	Psychiatrie infantile . . .	DUCHÉ (D.)
	POLONOVSKI (C.)	Rhumatologie	DELBARRE (F.)
	ROSSIER (A.)		
Pharmacologie	BOISSIER (J.)	Stomatologie	CERNÉA (P.)
	LECHAT (P.)		CHAPUT (M ^{me} A.), m. c. agr.
Physiologie	DEJOURS (P.)		GRELLET (M.)
Physique médicale	GOUGEROT (L.), m. conf.	Thérapeutique	CHASSAGNE (P.)
	pr. s. ch.		LAMOTTE (M.)
	KELLERSHOHN	Urologie	QUENU (L.)

III. — PROFESSEURS SANS CHAIRE ET AGRÉGÉS CHARGÉS DE COURS DE CLINIQUE ANNEXE à titre permanent.

	MM.		MM.
Anatomie	DEBEYRE	Clinique obstétricale . . .	GRASSET (J.)
			MAYER (M.)
			RAVINA (J.)
Clinique chirurgicale . . .	ABOULKER (P.)	Clinique ophtalmologique .	DESIGNES (P.)
	AELINE (A.), pr. s. ch.		OFFRET (G.)
	HUGUIER (J.)	Clinique oto-rhino-laryngo- logique	MADURO (R.)
	OLIVIER (C.)		
	PADOVANI (P.)	Clinique pédiatrique et pué- riculture	LAPLANE (R.)
	POILLEUX (F.)		
	ROUX (M.)	Clinique psychiatrique . .	BARUK (H.)
	VERNE (J.-M.)	Clinique urologique . . .	KUSS (R.)
Clinique médicale	DOMART (A.)	Médecine légale	GAULTIER
	PERRAULT (M.)		
	RAMBERT (P.)		
	THIEFFRY (S.)		

IV. — PROFESSEURS DÉTACHÉS DANS LES UNIVERSITÉS ÉTRANGÈRES

Bactériologie	HAUDUROY (P.) Pr. s. ch.
Pathologie chirurgicale	RUDLER (J.) Pr. s. ch.

V. — CHARGÉS DE COURS D'HYGIÈNE SCOLAIRE ET UNIVERSITAIRE	BOLTANSKI (E.)
	LAUNAY (G.)

Secrétaire général de la Faculté . .	M. LENA (J.)
Secrétaires	M ^{me} BEURLAND (H.), M ^{lle} CHAINTREUIL (G.), M ^{me} ROCHE (L.)
Conservateur en Chef	M. le Docteur HAHN (A.)
Conservateur	Mlle DUMAITRE (P.)
Bibliothécaires	Mmes CONTET (J.), FORGET (F.),
	Milles LAURENT (H.), LE NOIR (G.), QUIÉVREUX (E.)

Par délibération en date du 9 décembre 1798, l'Ecole a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

A la mémoire d'Emile SIBILLE

dont la vie exemplaire nous a illuminé.

A tous les miens.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550219_0012

A Monsieur le Professeur M. DEPARIS
Professeur à titre personnel
d'Hygiène et de Médecine Préventive
à la Faculté de Médecine de Paris,
Commandeur de la Légion d'honneur,

Qui nous a suggéré ce travail, aidé de ses
conseils et fait l'honneur de présider cette
thèse.

Qu'il veuille trouver ici l'expression de nos
hommages respectueux.

A Monsieur Douglas H. SCHNEIDER
Attaché Culturel
de l'Ambassade des Etats-Unis à Paris

Qui a mis largement et aimablement à notre disposition ses services de documentation et nous a ainsi fourni l'essentiel de nos matériaux d'études.

Qu'il veuille trouver ici l'expression de notre gratitude.

A Mesdames les Bibliothécaires
de la Bibliothèque Franklin-Roosevelt
à Paris

Dont le dévouement et la compétence nous ont été d'un grand secours dans nos investigations.

Qu'elles veuillent trouver ici la marque de notre amicale et sincère gratitude.

A Monsieur H. BAISSAS
Directeur du Cabinet
du Haut Commissaire à l'Energie Atomique

Qui a pris intérêt à notre travail et a
bien voulu nous faciliter quelques contacts.

Qu'il veuille trouver ici l'expression
de notre sincère gratitude.

A Monsieur le Médecin Général Inspecteur DEBENEDETTI
Directeur des Services de Santé des Armées

Qui a bien voulu répondre à nos questions
et nous faciliter l'accès aux Laboratoires
du Service de Santé.

Qu'il veuille trouver ici l'expression
de notre reconnaissance.

A Monsieur le Docteur J. CHANTEUR
Professeur Agrégé à la Faculté de Médecine de Paris
Centre de Protection contre les Radiations Ionisantes
de Fontenay-aux-Roses.

Qui a bien voulu accepter de faire la critique de nos plans de travail et nous a fait de très utiles suggestions.

Qu'il veuille trouver ici la marque de notre gratitude.

A Monsieur F. DUHAMEL
Chef de Service au
Centre d'études nucléaires de Saclay.

Qui a bien voulu consentir à nous communiquer ses travaux personnels.

Qu'il veuille trouver ici la marque de notre reconnaissance.

A Miss Beatrix COLLINGHAM
Directrice de la Bibliothèque
du British Council à Paris

Qui a eu l'obligeance de nous rechercher certains documents.

Avec nos vifs remerciements.

A Monsieur le Docteur MECHALI
du Centre de Fontenay-aux-Roses.

A Messieurs les Médecins
du Service de Détection des Radiations Ionisantes
du Centre Producteur de Marcoule

Qui ont bien voulu nous consacrer un peu de
temps pour des visites et des échanges de vue.

Avec nos sincères remerciements.

A nos maîtres,

Monsieur le Docteur Max FOURESTIER
Médecin-Chef de l'Hôpital de Nanterre
Chevalier de la Légion d'Honneur

Monsieur le Docteur Maurice AUDRY
Médecin-Chef de l'Hôpital de Nanterre

Monsieur le Docteur Georges LEFRANC
Médecin-Chef de l'Hôpital de Nanterre.

En témoignage de notre respectueux attachement

Qu'ils veuillent trouver ici l'expression de
notre gratitude pour tout ce qu'ils nous ont
apporté et pour les souvenirs heureux que nous
conservons de notre séjour dans leur service.

A toutes nos amitiés de la Salle de Garde de Nanterre.

A Mesdames les Infirmières
avec qui nous avons travaillé de 1955 à 1960.

I N T R O D U C T I O N

--

Les nombreuses explorations spatiales effectuées au cours des années 1958 et 59 nous ont appris l'existence de deux ceintures de radiations autour de la Terre : la première comprise entre 400 et 3.000 kilomètres d'altitude, doublant d'intensité tous les cents kilomètres à partir de 1.000 kilomètres ; la seconde entre 12 et 80.000 kilomètres ; séparées l'une de l'autre, selon Nesmeyanov, par une zone électrisée découverte par Lunik I. Van Allen se représente ces ceintures comme un plasma de protons et d'électrons provenant des jets solaires et occupant le volume d'un croissant en révolution autour de l'axe de notre planète. Ainsi que l'a montré Christophilos par le calcul et l'Opération Argus" (1), cette disposition est déterminée par l'action du champ magnétique terrestre. Par ailleurs, les mesures faites par Spoutnik III ont montré qu'à 1.600 kilomètres d'altitude la radioactivité est "cent fois plus forte que la valeur généralement admise comme côte d'alerte pour l'organisme"(A. Dueroq).

A l'abri de son bouclier atmosphérique - considéré jusqu'ici d'une épaisseur de 1.000 kilomètres et qu'on évalue actuellement à 3.000 kilomètres (Nesmeyanov) - et servie par son champ magnétique, qui nous protègent des radiations électromagnétiques et des particules rapides venues du Soleil et des autres points de notre galaxie (Rayons cosmiques), notre planète nous offre en somme un espace relativement isolé des fortes densités de radiations ionisantes ou non.

Nous vivons dans un refuge, au milieu d'une "Mer des Ténèbres".

(1) Production artificielle d'une aurore boréale par explosion d'une bombe atomique à très haute altitude.

Néanmoins, dans toutes les parties du Monde, l'homme est quotidiennement exposé aux radiations ionisantes de ces rayons cosmiques et surtout à celles des radio-éléments du sol, de l'eau, de l'air ; les radiations cosmiques comptant seulement pour le quart de l'ensemble des radiations naturelles rencontrées à la surface terrestre (James R. Arnold et E.A. Martell). L'irradiation ambiante due à ces éléments est évidemment très inégale et varie selon la situation géographique, la nature des sols, la latitude et l'altitude.

Les rayons cosmiques sont des particules issues très probablement de notre galaxie, qui subissent l'action de ces accélérateurs de particules que sont le Soleil et certaines étoiles. Tombés de la haute atmosphère, par désintégration de l'Azote, de l'Oxygène et d'autres atomes gazeux des couches comprises entre 11 et 24 kilomètres d'altitude, ils produisent essentiellement du Carbone 14, émetteur d'un rayonnement β de 0,15 MeV et du Tritium (1) ou Hydrogène 3, émetteur d'un rayonnement β de 0,02 MeV ; accessoirement du Beryllium 7, du Phosphore 32, etc...

Ce Carbone 14 - providence des archéologues - dont la période est de 56 siècles, entre dans le cycle du gaz carbonique (1) sous la forme de $C_{14}O_2$ et est concentré par l'homme au moment de son passage dans la Biosphère (2). Une molécule de CO_2 vit 5 ans dans l'atmosphère et 12 siècles en eau profonde. Le rayonnement cosmique en élabore 10 kilos par an : $1/10^{12}$ des atomes de Carbone sont des atomes radio-actifs naturels. Le rayonnement du Carbone 14 (naturel) à l'intérieur des tissus humains atteint 1 % du rayonnement interne global.

Le Tritium, produit presque totalement par la transmutation de l'Azote atmosphérique, se combine à l'Oxygène et suit le cycle de l'eau : celle-ci conservera son activité pendant 12 ans. Mais le Tritium se rencontre plus souvent à l'état libre que l'Hydrogène : d'où sa concentration

(1) Un proton à haute énergie bombarde un noyau d'Azote : la désintégration de celui-ci, outre un noyau de Beryllium et un noyau de Tritium, produit un neutron lent qui bombarde un second noyau d'Azote : cette seconde désintégration produit un noyau de Carbone 14 et un proton.

(I) Echanges continuel de Carbone entre le CO_2 et les carbonates de l'air et de l'eau d'une part et les êtres vivants d'autre part.

(2) Complexes reliant entre elles les vies organiques.

atmosphérique apparemment plus grande. L'eau des sols provenant de récentes précipitations et les masses d'air provenant des hautes altitudes ont de fortes concentrations en Tritium. Il existerait 9 kgs. de Tritium naturel dans l'Univers (3) : la plus grande partie est océanique ; 1 % est atmosphérique, ce qui équivaut à 10.000 Unités T (4).

Il existe d'autre part dans la Nature, trois grandes familles radio-actives et huit éléments naturels hors famille. Ces trois grandes familles sont celles du Thorium 232, de l'Uranium-Radium (U 238), et de l'Uranium-Actinium (U 233). Les huit éléments hors famille sont : le Potassium 40, le Rubidium 87, l'Indium 115, l'étain 124, le Neodyme 150, le Samarium 147, le Lutétium 176, le Rhénium 187.

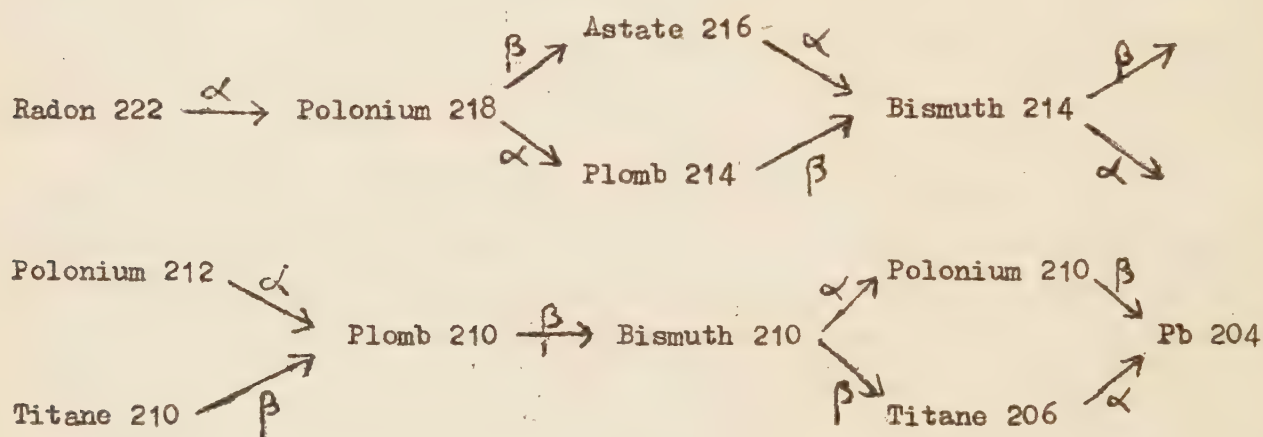
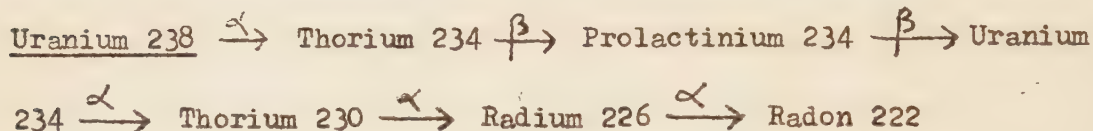
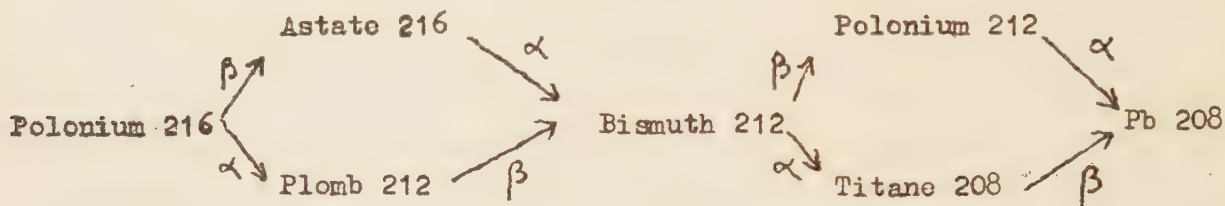
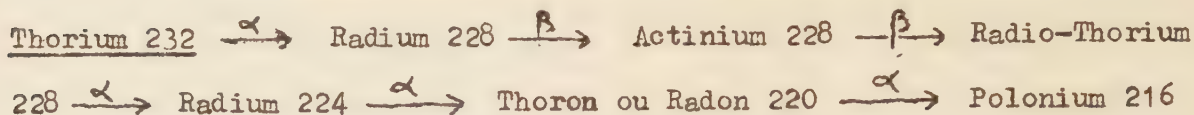
De ces onze éléments têtes de file, il en est trois qu'il faut détacher, car ils sont pratiquement à l'origine de la presque totalité des rayonnements naturels observés dans notre environnement. Ce sont l'Uranium 238 (toujours associé à 7/1.000 d'Uranium 235), le Thorium 232 et surtout le Potassium 40.

On estime que la moitié de la radioactivité terrestre est concentrée en profondeur à 65 kilomètres de la surface terrestre ; au niveau du sol, fortement atténuée elle n'est plus que de $1,75 \mu\text{c}/\text{km}^2$. Mais ce chiffre varie d'un lieu à un autre, d'un élément naturel à un autre dans des proportions de un à cinq : elle est par exemple plus élevée dans les régions granitiques (1), dans les régions sablonneuses de l'Inde et du Brésil riches en Thorium 232, dans l'Etat de l'Illinois dont l'eau contient de grandes quantités de Radium 224 et 226 (II).

Le Thorium 232 a une période de 14 milliards d'années, l'Uranium 238 4,5 milliards d'années, (l'Uranium 235, 713 millions d'années).

-
- (3) Selon Arnold et Martell. Charles-Noël Martin estime cette quantité à 1,8 Kgs.
- (4) Une Unité T de Tritium correspond à 1 atome de Tritium pour un milliard de milliards (10^{12}) d'atomes d'Hydrogène.
- (I) A 150 mètres d'une roche de granit, la dose d'exposition est de un rem (Roentgen équivalent man) d'après C.R. Mac Cullough (A.E.C.)
- (II) Pour apprécier la radioactivité d'une eau naturelle, en équilibre radio-actif (III), on dose les têtes de famille, le radium 226, les radons (radon, thoron, actinon).
- (III) Lorsqu'une substance radio-active-mère à très longue période donne naissance à une substance fille à courte période, un équilibre de régime

On peut schématiser ainsi leurs désintégrations respectives :



Ils émettent l'un et l'autre en se désintégrant une radioactivité α et, sans perte de masse, une radioactivité γ .

L'Uranium 238 et le Thorium 232 et la plupart de leurs descendants n'entrent pas de façon appréciable dans les processus métaboliques des êtres vivants. Une grande partie précipitent au fond des océans. Mais le Radium 226 et 210 - transuraniens - et le Radium 228 - transthorien - après accumulation par les végétaux, parviennent à l'homme et contribuent à la moitié de la radioactivité du squelette.

s'établit rapidement dans lequel le nombre des noyaux de cette substance-filleformés pendant un temps déterminé est égal au nombre de noyaux détruits pendant cette même période.

Lorsque la vie de la substance-mère est beaucoup plus courte que celle de la substance-fille, le problème est totalement différent : il n'y a plus d'équilibre radio-actif possible.

Le Potassium 40 entre par contre dans les processus métaboliques et produit la plus grande partie des radiations d'origine interne en se répartissant dans les parties molles. Sa période est de 1,4 milliard d'années. Il émet un rayonnement β assez élevé de 1,4 MeV et un rayonnement γ de 1,5 MeV ; un gramme de Potassium naturel a une activité de $4,07 \times 10^{-10}$ curie. On le trouve en grande abondance dans les Salines d'Alsace.

Le Rubidium 87, beaucoup moins abondant sur Terre que le Potassium 40 existe cependant à doses relativement fortes dans certains minéraux et les eaux en contact avec eux. Son rayonnement β de 0,275 MeV est assez mou ; la proportion de l'isotope radioactif par rapport au composé alcalin naturel est de 27,85 % ; sa contribution à la radioactivité naturelle est insignifiante.

Enfin, Uranium 238 et Thorium 232 produisent par transmutation du Radon 222 et 220 et le Potassium de l'Argon 40 qui, par diffusion s'échappent des sols pour se mélanger à l'air ou se dissoudre dans les eaux. La radioactivité de l'air est essentiellement due au Radon 222 et à ses dérivés. Il émet un rayonnement α : sa période est de 4 j.

Ces quelques notions, qu'avaient surtout mises en lumière après la seconde guerre mondiale les travaux de Willard F. Libby de l'Université de Chicago, nous rappellent donc brièvement que l'être humain est soumis à des degrés variables, mais depuis l'origine des temps à l'irradiation de ces 7 éléments naturels - Carbone 14, Tritium, Uranium 238, Thorium 232, Potassium 40, Radium 226, 228, Radon 222 - et de leurs dérivés qui produisent la totalité ou presque de la Radioactivité naturelle.

Jusqu'à 1932, date à laquelle Irène et Frédéric Joliot-Curie créèrent le premier isotope artificiel, une seule variété radioactive avait été étudiée. A partir de 1945 et surtout de 1952, période des premiers essais intensifs d'explosions nucléaires, la concentration des isotopes radioactifs dans notre environnement a été fortement modifiée. L'état actuel de la pollution a été clarifié grâce aux nombreuses mesures entreprises aux U.S.A. (21 stations d'études disposées le long du Méridien 80° Ouest, depuis Thule dans le Groëland jusqu'à Punta Arenas au Chili), en Grande Bretagne, en Suède, en Autriche, en U.R.S.S., en Australie et au Japon.

L'ensemble des tests effectués jusqu'en Novembre 1958, c'est-à-dire jusqu'à l'agrément tacite suspendant les essais, ont pour une énergie de 174 mégatonnes (92 par fission et 82 par fusion) produit 4,5 tonnes de produits de fission (ensemble des dérivés de l'Uranium et du Plutonium) et 45 kilos de Tritium, soit cinq fois la production naturelle de ce radio-élément. L'interaction des neutrons avec différentes substances des milieux naturels a donné naissance à une tonne environ de Carbone 14 soit 1 % du total de la concentration naturelle en Carbone. Outre ces produits dont l'origine est évidente, ces explosions se sont accompagnées de la synthèse d'isotopes dont on ne comprend pas très bien le mode de formation, tels le Zinc 65 (peut-être serait-il produit par un haut flux de neutrons sur le Zinc 64 des couvertures métalliques où sont entreposées les bombes thermonucléaires ?), le Manganèse 54, le Fer 55 et 59, le Nickel 63, le Cobalt 57, 58 et 60. Enfin une certaine quantité de Plutonium 239 et l'Uranium 233 et 35 non utilisée par l'explosion ainsi que les transuraniens formés par la capture de neutrons par les carapaces en Thorium 232 et Uranium 238 des superbombes H, a été dispersée.

On sait que la radioactivité du mélange des produits de fission décroît de 90 %, lorsque le temps qui les sépare de l'explosion productrice croît d'un facteur de 7. Ce qui revient à dire que 7 jours après l'explosion, le niveau d'activité est le 1/10 et après 2 semaines le 1/1.000 de ce qu'il était dans l'heure qui suivait l'explosion.

Des 90 isotopes identifiés parmi les produits de fission, 2 sont au centre des préoccupations des savants, des médecins et du public : le Strontium 90 et le Césium 137. D'autres ont attiré également l'attention, par exemple l'Iode 131 et le Baryum 140 ; mais du fait de leur période courte, ces deux isotopes ne se rencontrent plus.

Au début de 1959, la radioactivité du Strontium s'élevait à 8,5 millions de curies ; celle du Césium à 15 millions de curies. La valeur moyenne de leur rapport d'activité Cs 137/Sr 90 est de $1,64 \pm 0,34$: on sait que c'est à partir du dosage du Césium 137 et en tenant compte de cette valeur que l'on obtient les concentrations de Strontium 90. Tous deux peuvent participer aux métabolismes de l'homme car l'un, le Strontium a des propriétés

voisines du Calcium (1) ; l'autre se rapproche chimiquement du Potassium. Le Strontium sera donc concentré au niveau de l'os pouvant occasionner tumeurs osseuses et leucémies. Le Césium se répartira dans les parties molles et constituera un danger pour le patrimoine génétique.

On estime que la charge maximum admissible en Strontium 90, pour un sujet faisant partie d'un grand ensemble de population est de 0,1 microcurie, ce qui équivaut à 100 Unités Sunshine (1 Unité Sunshine correspond à 1 μ microcurie de Sr 90 par gramme de calcium). La charge actuelle du squelette en Sr 90 est de 0,1 à 0,2 unités Sunshine, c'est-à-dire le 1/500 à 1/1.000 de la charge maximum admissible. Chez les enfants cette charge atteint le 1/100 environ du maximum admissible. Sa période radioactive est de 28 ans et sa période biologique (demi-vie dans l'organisme d'un élément à partir du moment où cet élément est en équilibre dynamique et qui correspond à sa vitesse d'élimination) est d'environ 10 ans. Le Strontium est un émetteur β .

Le Césium est un émetteur γ . Sa période est de 30 ans et sa période biologique de 140 jours : du fait de sa répartition globale dans les parties molles de l'organisme et de sa courte période biologique, le Césium est beaucoup moins dangereux que le Strontium.

L'altitude atteinte par le nuage qui suit l'explosion influence directement le cycle des particules radioactives dans l'atmosphère : le nuage des bombes de petite ou moyenne puissance ne dépasse pas la tropopause (1) ; le nuage des bombes très puissantes atteint d'emblée la stratosphère. On distingue ainsi les trois sortes de retombées qui correspondent à des altitudes et des temps différents ;

- la retombée locale précoce,
- la retombée troposphérique intermédiaire,
- la retombée stratosphérique retardée.

(1) Les études poursuivies chez l'homme à l'aide du Sr 85, 89 et 90 tendent à montrer que le métabolisme du Strontium n'est pas du tout superposable à celui du calcium (J.C. Lods. P.M. 18 avril 1959, p. 773).

(1) Ligne imaginaire séparant la troposphère qui s'étend jusqu'à douze mille mètres, de la Stratosphère située entre 12.000 et 15.000 mètres. Dans la Troposphère les courants aériens sont très actifs et se déplacent d'Ouest en Est beaucoup plus que vers le Nord ou le Sud. Dans la Stratosphère les courants sont rares et lents.

Les retombées locales précoces concernent les particules les plus lourdes dont le diamètre est compris entre quelques dixièmes de millimètre et quelques centimètres. Elles retombent immédiatement dans la zone d'explosion.

Les retombées troposphériques intermédiaires intéressent les particules extrêmement fines qui restent en suspension dans l'air et ne retombent qu'entre la 4ème et la 7ème semaine qui suivent l'explosion. La retombée s'effectue suivant une bande de quelques degrés de latitude, mais ceinture le globe. Elle ne franchit pas habituellement l'Equateur. Les retombées troposphériques entrent pour un faible pourcentage dans le total des retombées : elles atteignent les sommets montagneux d'où les pluies et la neige les entraînent vers les régions habitées.

Les retombées stratosphériques comptent pour les deux tiers des retombées radioactives. Il semble que la diffusion annuelle vers la troposphère est de l'ordre de 10 % du stock stratosphérique. Les gros nuages radioactifs se situent le plus souvent dans la stratosphère et leur diffusion est universelle, du fait de la petitesse et de l'abondance des particules et de l'inexistence des précipitations (des études un peu poussées ont montré que les très petites particules - de moins de 5μ - n'obéissent pas à la loi de Stokes et restent en suspension plus longtemps). Des enregistrements récents ont prouvé cependant que ces retombées avaient tendance à se concentrer dans la zone Tempérée septentrionale et atteignaient leur maximum au Printemps. Ceci s'explique en partie par les variations selon la latitude et les saisons, du transport de l'air de la Stratosphère vers la Troposphère. Mais surtout par une particularité de la Tropopause : au-dessus de l'Equateur celle-ci "monte" à 16 kilomètres et "descend" ensuite à 9,5 kilomètres au-dessus des latitudes moyennes. Les vents d'Ouest en Est de la Troposphère font donc une trouée dans cette Tropopause, qui offre ainsi une possibilité d'échanges plus rapides entre la Stratosphère et la Troposphère au-dessus de ces latitudes. On pense que cette trouée favoriserait également le passage des rayons cosmiques au niveau des latitudes moyennes.

Si nous ajoutons à ces sources de rayonnement, celles que constituent les besoins médicaux (radiodiagnostic, radiothérapie, isotopes), nous voyons que l'homme moderne subit une irradiation de fonds permanente, inéluctable

et inoffensive - du moins tant qu'elle ne dépasse pas trop le niveau de la radioactivité naturelle qui, elle, n'a jamais nui à nos ancêtres.

En somme, depuis des millénaires, les rayonnements déploient leur énergie trop au-dessus ou trop au-dessous de nous pour nous menacer : la nature, une fois de plus s'en prend à l'imaginaire. Une minorité nous témoigne leur présence. Présence sans cesse mouvante qu'un Léonard de Vinci - il y a de cela presque cinq siècles - semblait avoir conçue : "l'air est rempli d'infinies lignes droites et rayonnantes, entrecroisées et tissées sans que l'une emprunte le parcours d'une autre, et elles représentent pour chaque objet la vraie forme de leur raison".(Peut-être ne voyait-t-il dans l'air que la lumière ? Mais si lumineusement déjà !)

Cette "minorité" ne fut donc et n'est qu'un tribut supportable. Il nous incombe de ne pas l'alourdir.

La domestication de l'énergie nucléaire n'est qu'une semi-domestication car si nous avons pu asservir la partie stationnaire de cette énergie, qui nous est utile, nous ne pouvons contenir sa partie rayonnante qui nous menace : de ces rayonnements découlent les problèmes qui nous occupent. Quels sont ces problèmes ?

Ils sont liés à la propriété ionisante de ces rayonnements. Cette propriété entraîne dans les organismes des effets délétères à brève ou à longue échéance, selon la quantité d'énergie absorbée par ces organismes. Il convient donc d'éviter ces effets immédiats et retardés. Essentiellement :

- En restreignant la libération des Radiations ionisantes qui les produisent,

- En limitant l'exposition de l'homme à ces rayonnements.

Ces deux sortes de mesures seront réglées le plus minutieusement possible par des normes de protection.

Les effets immédiats sont produits par des doses qui ne sont pas basses mais uniques ou peu fréquentes : on les rencontrera surtout chez les travailleurs des stations atomiques.

Les effets tardifs sont produits par de petites doses basses et répétées : on les observera parmi la population.

Les premiers demanderont une protection immédiate et constante qui sera en rapport avec le processus de création de l'énergie. On se préoccupera de s'en protéger au moment de la fondation et pendant la création des réacteurs.

Les seconds demanderont une vigilance moins grande, mais plus étendue, c'est-à-dire la surveillance du milieu environnant : on voit qu'à l'échelle des populations" la protection contre les radiations ionisantes est devenue une importante question d'hygiène" (J. Boyer).

C'est à propos de la population que se pose donc la question de savoir par quels mécanismes se produisent ces effets tardifs délétères. Pratiquement, une fois prises les précautions qui assurent la sécurité des réacteurs, la protection de la population revient à la prémunir contre les effets tardifs dus à l'accumulation de petites doses répétées. La surveillance directe des doses absorbées étant impossible à l'échelle d'une collectivité, on conçoit que les normes intéressant la population ne seront fixées que pour des moyennes statistiquement observables, et que ces normes dépendront de nos connaissances de la manière dont la collectivité pourrait être ou est atteinte.

Malheureusement, nous verrons que nous ne pouvons serrer de près ni le mécanisme intime de la production des effets somatiques retardés, ni l'étendue réelle des effets génétiques, qui sont les deux principaux ordres de risques qui menacent une population. Comme l'a écrit Valéry, dans "son Bilan de l'Intelligence", "Dans le passé, on n'avait guère vu en fait de nouveauté paraître que des solutions ou des réponses à des problèmes ou à des questions très anciennes, sinon immémoriales. Notre nouveauté à nous consiste dans l'inédit des questions elles-mêmes et non point des solutions ; dans les énoncés et non dans les réponses".

N O T I O N S

D E

R A D I O B I O L O G I E

APERCU SUR L'ACTION BIOLOGIQUE DES RADIATIONS IONISANTES.

--

"L'immense majorité des réactions radiobiologiques à l'échelle d'un organisme complexe tel que l'homme ne sont en définitive que la conséquence des phénomènes génétiques intervenant à l'échelle cellulaire.

Ces phénomènes ne doivent plus être considérés comme une espèce d'évènement indépendant de toute circonstance extérieure, en particulier du milieu cellulaire ambiant".

R. Buchet et G. Breitman.

I - Quelle que soit la nature de la radiation absorbée par une substance, lorsque cette radiation est suffisamment énergétique il se produit, dans tous les cas, une ionisation de cette substance, c'est-à-dire une formation de paires d'ions.

On sait que cette ionisation est directe dans le cas des rayonnements particuliers α et β ; indirecte dans le cas des rayonnements électromagnétiques X et γ et dans le cas des neutrons. Il y a émission secondaire de rayons β ionisants par les rayonnements électromagnétiques et de protons ou particules H (noyaux d'hydrogène) par les neutrons.

La formation d'une paire d'ions nécessite, en moyenne, le transfert d'une énergie de 33,5 eV, aux dépens de l'énergie de la radiation absorbée. Le transfert d'énergie linéaire d'un rayonnement (quantité de KeV transférés par unité de longueur de trajectoire) et la masse des particules-projectiles conditionnent la répartition des paires d'ions. Les radiations α provoquent une ionisation en colonne sur leur parcours rectiligne ; les radiations β , X et γ une ionisation sinueuse, embrouillée.

La constance de cette ionisation de la matière par les radiations ionisantes explique la similitude des réactions biologiques observées dans tous les cas. Toute cellule vivante, animale ou végétale, soumise à une irradiation continue, subit donc des altérations en rapport avec la quantité d'énergie absorbée. Ces altérations aboutissent à la mort de ces cellules, de la matière vivante. La mort des cellules atteintes par une radiation ionisante peut être immédiate et correspond alors à deux processus possibles : la nécrose de coagulation ou la nécrose de liquéfaction. Elle peut être, au contraire, différée : soit par suite d'une suppression de la reproduction, soit parce que des anomalies de la division cellulaire provoquent l'arrêt de celle-ci, soit enfin du fait de lésions latentes qui ne se manifesteront qu'après un certain délai.

II - En dépit de cette similitude de nature des réactions biologiques consécutives à une irradiation ionisante, la quantité d'énergie absorbée nécessaire pour l'obtention d'une même lésion varie selon les cellules, les tissus ou les micro-organismes envisagés. En d'autres termes, l'apparition d'une lésion déterminée, observable, après application d'une certaine dose de radiation ionisante, caractérise la sensibilité d'une cellule ou d'un tissu donnés à cette dose et à la nature de ce rayonnement : c'est ce qu'on appelle leur radiosensibilité.

En somme, tout critère de radiosensibilité suppose qu'on a au préalable :

- défini la nature de la radiation ionisante utilisée,
- fixé la dose à administrer,
- établi le choix de la lésion recherchée.

Cette radiosensibilité s'exprime par le pourcentage d'éléments atteints : autrement dit, elle correspond à une notion de probabilité.

La radiosensibilité apparut aux chercheurs du début du siècle, comme étant une manifestation d'ordre cellulaire. En 1906, Bergonié et Tribondeau synthétisèrent en trois points les lois qui en expriment les variations :

"Les radiations agissent avec d'autant plus d'intensité sur les cellules :

- que leur activité reproductrice est plus grande ;
- que leur avenir caryocinétique est plus long ;
- que leur morphologie et leurs fonctions sont moins définitivement fixées".

La première loi exprime l'augmentation de la radio-sensibilité au cours de la mitose. La seconde s'applique aux têtes de lignées (1) : mais on ne sait si ces cellules "à long avenir caryocinétique" sont particulièrement radiosensibles en raison de ce caractère ou parce qu'elles ont également une grande activité mitotique. La troisième loi implique une perte de la radiosensibilité parallèle au degré de différenciation (1) de la cellule et, réciproquement, un accroissement de cette radiosensibilité lorsque la cellule se dédifférencie (cas des tissus qui se régénèrent, des cancers).

Engelman compléta en quelque sorte ces lois en dressant un tableau de la radiosensibilité des tissus (2), en allant des plus radiosensibles aux moins radiosensibles : Tissu hématopoïétique, Thymus, Ovaire - Testicule, Papille des cheveux, Muqueuses et Glandes muqueuses, Glandes sudoripares et sébacées, Epiderme, Séreuses, Reins et Surrénales, Foie - Pancréas - Glandes digestives, Thyroïde, Muscles striés - Conjonctif - Vaisseaux, Os, Tissu nerveux.

(1) Cellules de la couche basale de Malpighi pour la peau ; cellules blastiques de la moëlle pour les tissus hématopoïétiques ; spermatogonies pour la lignée séminale. Les actions sur les têtes de lignée en ce qui concerne les follicules primordiaux s'écartent de la loi de Bergonié et Tribondeau.

(1) Le rapport A.D.N./protéines permet d'apprécier grosso modo le degré de différenciation cellulaire. Il est fixe pour les tissus homologues des diverses espèces animales (Leslie). Il diminue au cours de la vie embryonnaire jusqu'à la naissance où il atteint une valeur minimum. Il augmente parallèlement à l'activité mitotique et dans les tissus néoplasiques. Enfin il existe une légère différence selon les sexes : il est plus élevé chez la femme (2 chromosomes X) que chez l'homme. Ce rapport est inférieur à 1,5 pour le foie, le cerveau ; il atteint 23 dans les spermatozoïdes.

(2) On distingue actuellement une radiosensibilité cellulaire et une radiosensibilité tissulaire.

En fait, les lois de Bergonié-Tribondeau se trouvent souvent en défaut :

- D'une part, parce que l'activité mitotique et la différenciation cellulaire ne sont pas les seuls supports de la radiosensibilité cellulaire (2) ; laquelle dépend aussi :

- des modifications de l'activité métabolique de la cellule, elle-même étroitement commandée par des phénomènes génétiques intervenant à l'échelle cellulaire.

- des modifications artificielles du milieu cellulaire : pH, degré d'hydratation, oxygène dissous, débit, température.

- D'autre part parce que les exceptions sont fréquentes. Par exemple, lorsqu'on considère les résultats obtenus par l'irradiation de l'ovaire (à la dose de 1.200 r), on remarque que toutes les variétés de follicules, présentes au moment de l'irradiation sont lésées, mais que si les follicules en évolution, peu nombreux et de gros volume dégénèrent en totalité, parmi les follicules primordiaux petits et très nombreux, certains échappent à la destruction (Lacassagne et Gricouroff). Il s'avère que l'ovocyte d'un follicule primaire est plus radiosensible que les cellules folliculeuses qui l'entourent, tandis que dans les follicules mûrs de De Graff, les mêmes cellules folliculeuses sont les premières touchées et l'ovocyte dégénère ensuite par autolyse. Or il ne s'agit pas d'une maturation plus grande de l'ovocyte qui reste toujours, jusqu'à maturation un ovocyte de premier ordre (Buchet et Breitman). Les faits observés ne peuvent s'expliquer que si l'on tient compte des probabilités qu'ont les bombardements électroniques d'atteindre leur objectif :

- plus le volume de celui-ci est important, plus il y aura de "coups au but" ;

- plus le nombre d'objectifs est grand, plus il y aura de chances que certains éléments soient épargnés.

Nous sommes ainsi conduits à évoquer la théorie de la cible.

III - Suivant qu'il s'agisse d'une cellule, de substance extracellulaire ou d'un milieu humoral :

- l'absorption d'un rayonnement s'effectue d'une manière différente,
- l'ionisation a des conséquences qui dépendent du milieu dans lequel elle se produit.

Ces variations du mode d'action des radiations ionisantes avec le milieu organique qui les absorbe, amène à distinguer :

- leurs effets cytologiques,
- leurs effets exoplasmiques,
- leurs effets humoraux.

—:—

LES EFFETS CYTOLOGIQUES DES RADIATIONS IONISANTES

—=—

—:—

On peut grouper l'ensemble des travaux concernant ces effets sous deux modes d'action :

- L'action directe associée à l'action à distance des radiations ionisantes.
- L'action indirecte.

ACTION DIRECTE ET ACTION A DISTANCE DES RADIATIONS IONISANTES

THEORIE DE LA CIBLE

--

1 - En s'adressant aux levures et aux protozoaires, Holweck et Lacassagne montrent en 1928 qu'il y avait concordance entre la proportion des lésions constatées et celles que le calcul des probabilités permet de supposer.

2 - Des cellules aussi semblables que possible, irradiées dans des conditions techniques identiques (rayons monochromatiques) présentent des lésions très inégales, qui sont, par ordre de gravité décroissante :

- la mort immédiate
- la suppression de la reproduction,
- des anomalies abortives de la division cellulaire,
- un retard de croissance,
- la transmission héréditaire d'une radiomutation.

3 - Les effets cytologiques observés ont conduit Holweck et Lacassagne à interpréter les diverses radiolésions cellulaires d'après la théorie des quanta sur l'absorption discontinue des rayonnements.

On sait que les rayons électromagnétiques dispersent leur énergie de façon discontinue et localisée. La théorie des quanta de Planck admet que l'énergie totale d'un faisceau de rayonnement électromagnétique varie par "bonds", par "quantum d'énergie", fixe pour chaque radiation :

$$W \text{ (ergs)} = h\nu \quad (\text{Formule de Planck})$$

ν = fréquence

h = constante universelle de Planck

$$= 6,684 \times 10^{-27} \text{ erg - seconde.}$$

Quelle que soit la distance à laquelle se trouve la source radiante l'énergie ne se dégrade pas.

Pour une espèce cellulaire déterminée, connaissant les volumes des centres moteurs, du centrosome, du noyau, du cytoplasme, on peut prévoir la répartition globale des photoélectrons intéressant chacun des organites, et vérifier au microscope que chacun des principaux types de lésions est proportionnel au volume occupé dans la cellule par tel ou tel de ces organites.

En fait, Holweck et Lacassagne observent que :

- L'absorption simultanée d'un grand nombre de "projectiles" ionisants, dans une cellule dont ils détruisent tous les constituants, entraîne la mort immédiate de cette cellule.

- La destruction du Centrosome a pour conséquence la suppression de toute division cellulaire.

- La destruction d'une quantité plus ou moins grande de chromatine nucléaire empêche l'achèvement de la caryocinèse.

- Les malformations héréditaires correspondent à une lésion portant sur un point particulier du matériel chromosomique.

4 - Holweck et Lacassagne admettent donc :

1 - Qu'il existe une "zone sensible" dans chaque cellule, la CIBLE qui doit être obligatoirement touchée pour que se produise un effet.

2 - Que toute ionisation survenant dans la cellule en dehors de cette cible est inefficace.

3 - Que toute ionisation produite à l'intérieur de cette cible est un "coup au but".

4 - Qu'un effet déterminé peut nécessiter un ou plusieurs coups.

5 - Ainsi, pour une espèce cellulaire donnée, la radiosensibilité cellulaire apparaît comme étant fonction de deux facteurs :

= La structure histologique dont dépendent les volumes respectifs des zones sensibles (l'ionisation de ces zones sensibles déterminant la lésion observée).

= La composition physico-chimique qui conditionne la quantité de particules nécessaires à la désintégration des molécules des organites cellulaires.

6 - Avec Lacassagne et Gricouroff, il convient d'observer que dans cette conception :

a - L'expression de "dose léthale" n'a plus de sens précis : des cellules d'une même espèce, irradiées dans les mêmes conditions meurent après avoir reçu des doses extrêmement variées.

b - Les lois de Bergonié et Tribondeau ne font que traduire une coïncidence fréquente entre un grand volume de zones sensibles (centrosomes, noyaux) et une grande activité mitotique.

c - Des cellules ayant subi des lésions de leur chromatine, mais se divisant peu, paraîtront avoir subi des dommages moins sérieux, quoiqu'équivalents, que des cellules se renouvelant fréquemment. Elles présenteront des dommages à l'état inapparent.

d - On comprend qu'on ne puisse obtenir d'effet sélectif absolu sur une seule espèce cellulaire, sans provoquer des destructions cellulaires plus ou moins marquées des organes voisins.

7 - Au total, l'irradiation générale ou locale d'un organisme entraîne la mort immédiate ou différée d'un plus ou moins grand nombre de cellules par une action directe : les ions produits au lieu même de l'absorption de l'énergie du rayonnement altèrent les molécules de la cellule. Il en résulte des altérations intra-cellulaires qui se manifestent sous la forme des différents types de radiolésions observées.

Mais ces cellules, en se désintégrant, libèrent des produits de déchets - des NEVROHORMONES (Lacassagne et Gricouroff) - qui peuvent :

- soit s'éliminer partiellement à l'extérieur (Ulcérations)
- soit passer dans le milieu intérieur, dont ils modifient la composition : il s'agit de l'action à distance des radiations ionisantes.

L'intoxication par ces nécrohormones ne s'exerce plus à l'échelle locale cellulaire, mais à l'échelle de l'organisme tout entier.



ACTION INDIRECTE DES RADIATIONS IONISANTES.

THEORIE DITE DE L'EAU ACTIVEE



Bien avant que la notion du discontinu dans l'absorption des radiations ionisantes ne fût soupçonnée, une autre interprétation des faits observés avait été envisagée. On supposait que les lésions cellulaires étaient dues à une action indirecte, qu'un processus chimique s'intercalait entre le processus physique primaire et le processus biologique terminal.

Cette théorie fut d'abord rejetée, faute de preuves expérimentales. Elle fut reprise quand en 1923, Petry montra que la radiosensibilité de graines et de radicules augmentait en présence de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et était inhibée par l'absence d'oxygène. Piffault, en 1937, à l'aide de paramécies, et Bonnet-Maury, en 1941, à l'aide de virus vaccinal, démontraient que les rayons X agissaient en faisant apparaître de fortes proportions d'eau oxygénée.

En 1937, Scott remettait en doute l'intervention de processus radiochimique car - du moins en radiothérapie - les modifications perceptibles ne pouvaient être obtenues qu'avec des doses supérieures aux doses maximum tolérables. En 1943-44, Dale montra l'erreur de cette conclusion. Confirmant les travaux de Fricke, il montra que des systèmes enzymatiques, considérés autrefois comme des systèmes très radiorésistants, peuvent au contraire devenir extrêmement radiosensibles s'ils sont en solutions diluées : l'effet est inversement proportionnel à la concentration, donc indirect.

Parallèlement, en 1942, Loiseleur prouvait que les rayons X agissent par réactivation de l'oxygène moléculaire présent à l'état dissous dans le milieu irradié (une irradiation effectuée en présence d'oxygène apparaît comme une radiooxydation) ; tandis que Weiss, en 1944, attribuait aux radicaux libres H. et OH., provenant de la radioactivation des molécules d'eau et intervenant par des processus d'oxydo-réduction, le mécanisme auquel on réserve aujourd'hui l'appellation d'action indirecte des radiations ionisantes.

Enfin, il convient de mettre l'accent sur la possibilité d'effets encore moins directs que l'on range dans l'hypothèse du "poison diffusible" : poison libéré par réaction photochimique dans les milieux biologiques.

La chimie de l'eau irradiée a donné lieu à d'importants travaux,

- d'une part, parce qu'étant le constituant fondamental des tissus biologiques, on pouvait supposer que les modifications de l'eau irradiée auraient un retentissement important dans le mécanisme des radiolésions ;

- d'autre part, parce qu'elle joue un rôle important dans la chimie des produits de fission (réacteurs, refroidisseurs).

En ce qui concerne l'interprétation du mécanisme de production des radiolésions, on peut se représenter la succession des phénomènes en envisageant trois phases :

= une phase physique qui correspond à l'ionisation,

= une phase radiochimique qui a pour point de départ la formation de radicaux libres,

= une phase biologique qui aboutit à l'altération cellulaire.

I - PHASE PHYSIQUE : L'IONISATION ET LES REACTIONS IONIQUES :

Nous rappellerons simplement :

- l'hypothèse fondamentale de Bordier,

- la définition de l'ion et du radical libre,
- la destinée des ions formés et de l'électron éjecté au cours des réactions ioniques.

1 - Bordier en 1913, attribuait l'action biologique des radiations à la formation d'ions dans la matière vivante. Cette hypothèse fondamentale n'explique pas complètement le mécanisme d'action des rayonnements, mais constitue le point de départ de toute action radiobiologique. Nous en avons déjà rappelé les caractéristiques essentielles.

2 - Définitions :

= ION : Atome ou édifice moléculaire qui, par perte d'un électron, présente une charge positive et, par excès d'un électron, une charge négative.

= RADICAL LIBRE : Atome ou édifice moléculaire, électriquement neutre, dont la couche orbitale externe manque d'un ou plusieurs électrons. Cet ensemble qui n'est pas saturé n'a pas de configuration stable, comme celle de l'octet complet. La présence d'un électron "célibataire" donne au radical libre une haute réactivité. On sait en effet, que chaque électron tourne sur lui-même autour d'un axe perpendiculaire à son orbite avec un moment magnétique (spin) égal à $\pm 1 / 2$, suivant le sens de la rotation. Dans une molécule stable, les électrons de spins opposés sont appariés deux à deux, de sorte que l'ensemble a un moment magnétique résultant nul. Pour le radical libre, puisqu'il existe au moins un électron célibataire, le moment magnétique n'est pas nul. Sa tendance sera d'acquérir le ou les électrons manquants : d'où sa réactivité très grande et sa durée de vie très courte (inférieure à 10^{-6} sec.). Les radicaux libres non chargés électriquement s'écrivent avec un point pour désigner l'électron célibataire : OH. H.

Dans le cas de la décomposition de l'eau, nous rencontrerons les deux radicaux libres OH. et H.

- Le radical Oxhydrile provient de la rupture de liaison H - OH d'une molécule d'eau ou dans un ion H_2O^+ .

- L'hydrogène atomique : mis à part les gaz rares qui ont une structure électronique correspondant à un octet complet, tous les atomes libres sont des radicaux libres.

L'hydrogène atomique peut acquérir une structure électronique stable soit en captant un électron (ion H^- à structure d'Hélium) ; soit en perdant son seul électron (ion H^+ ou proton).

= VALENCE : C'est le nombre d'électrons qui manquent à la couche périphérique d'un élément pour que celui-ci soit saturé et constitue un octet.

3 - Réactions ioniques :

a - L'électron éjecté peut selon l'intensité de l'énergie que lui a transférée la radiation ionisante absorbée :

- soit se thermaliser, lorsque l'énergie acquise est $\neq 0,1$ eV.

- soit provoquer des phénomènes identiques à la particule ionisante primaire par production de rayons γ . Ce rayonnement particulaire secondaire peut ioniser une série de molécules et créer des "paquets d'ionisations" locales concentrées, même lorsque le rayonnement incident produit en moyenne une densité d'ions très faible.

b - Les ions formés par irradiation sont des ions à radical libre (nombre impair d'électrons). Lorsqu'un électron ou un rayon α traversent des molécules d'eau, les produits obtenus en fonction du temps écoulé sont les suivants :

- 10^{-15} sec. : e^- lent
- 10^{-13} sec. : OH.
- 10^{-10} sec. : H., H_2 , OH.
- 10^{-8} sec. : H., OH.

Ces ions à radicaux libres peuvent :

= soit se neutraliser entre eux : à la suite d'une collision, il y a mise en commun des deux électrons célibataires et formation d'une liaison chimique primaire.

= soit se neutraliser avec un électron libre : un radical libre OH. par exemple, par gain d'un électron, se transforme en ion OH⁻ stable :



Un radical OH. accepteur d'un électron est un oxydant.

- soit réagir chimiquement, avec les molécules des corps dissous par exemple.

c - Le fait capital (1) qui permet à ces différentes réactions de se produire est la localisation extrême des radicaux libres dans l'espace et dans le temps, c'est-à-dire leurs productions respectives en des temps et des lieux différents : c'est ce qu'on appelle la distribution inhomogène des radicaux libres. Si les radicaux OH. et H. étaient uniformément groupés, la réaction la plus rapide et la plus probable de toutes - la recombinaison $\text{OH.} + \text{H.} = \text{H}_2\text{O}$ - annulerait les effets de l'irradiation.

Nous développerons les différents aspects de la formation et du devenir des radicaux libres en abordant la phase radiochimique proprement dite.

II - PHASE RADIOCHIMIQUE : FORMATION ET ROLE DES RADICAUX LIBRES.

A - IONISATION DE L'EAU : FORMATION DES RADICAUX LIBRES

OH., H., ET DE L'EAU OXYGENEE.

1 - Arguments mettant en évidence la formation de radicaux libres :

a - Fricke puis Dale observent que les systèmes enzymatiques, deviennent plus radiosensibles en solution diluée : l'effet produit par l'irradiation de ces systèmes est inversement proportionnel à leur concentration dans l'eau. Tout se passe comme s'il y avait formation d'un

(1) du moins dans la théorie de Lea et pour les rayons α .

intermédiaire à vie courte dont la concentration à chaque instant contrôle la vitesse de réaction.

De même si l'on irradie des solutions de sels ou de composés divers, le rendement de la transformation du corps dissous augmente d'abord lorsque la concentration du corps dissous croît, puis atteint un palier à partir duquel l'accroissement de la concentration du corps dissous n'a plus d'influence. L'énergie est pratiquement totalement absorbée par l'eau (lorsque la dilution est grande) et il y aurait alors formation de substances intermédiaires (les radicaux libres). Lorsque la concentration du corps dissous est suffisante pour capter tous les radicaux issus de l'eau, il ne peut plus y avoir augmentation du rendement, si l'on augmente cette concentration.

b - L'analyse du spectre de la vapeur d'eau irradiée, en présence d'Oxygène, montre une bande caractéristique attribuée au radical OH.

c - Weiss a montré qu'en présence d'un même substrat les radicaux OH. produits chimiquement et radiologiquement ont une action identique. L'hydroxylation est une des caractéristiques les plus nettes des effets des rayonnements sur les composés organiques en solution aqueuse.

En présence d'un réactif de Fenton ($H_2O_2 + Fe^{++}$) les rayons X hydro-sylent le Benzène en Phénol :

L'eau oxygénée (H_2O_2) se décompose en 2 OH.. Le radical oxhydrile peut :

= soit oxyder l'ion ferreux (donneur d'électrons) en ion ferrique :



= soit oxyder le radical phényl (donneur d'électrons) :



La présence d'oxygène dissous quintuple le rendement de la réaction.

d - On sait que la caractéristique d'un radical libre est de posséder un moment magnétique non nul, du fait du spin de son électron célibataire. On peut donc détecter la présence de radicaux libres par résonnance en irradiant de la glace (à -190°) qui permet de "piéger" ces radicaux, c'est-à-dire de diminuer leur diffusion.

e - Nous verrons qu'avec un composé organique, un seul quantum d'énergie absorbée permet la formation de plusieurs peroxydes, en présence d'oxygène dissous.

2 - Importance de l'Oxygène dissout :

Les travaux de Fricke ont attiré l'attention sur l'importance de ce facteur, ainsi que ceux, plus récents de l'école française.

Les radiochimistes distinguent l'eau chimiquement pure de l'eau distillée qu'ils considèrent comme un mélange de $H_2O + O_2$.

L'eau chimiquement pure est insensible aux rayons X et γ . Par contre, en présence d' O_2 il y a formation de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) dont la production dépend de la dose de rayonnement et de la concentration en oxygène de l'eau.

Dans le cas des rayons α le phénomène est différent. Il y a production d'eau oxygénée aussi bien dans l'eau pure que dans le mélange $H_2O + O_2$. La courbe de production en fonction de la dose est linéaire.

Nous donnerons, en développant la théorie de Lea, une explication de ces faits.

3 - Formation et Comportement des Radicaux libres au cours de l'irradiation de l'eau

Selon l'énergie transférée à la molécule du corps qui absorbe un rayonnement ionisant, les électrons périphériques sont :

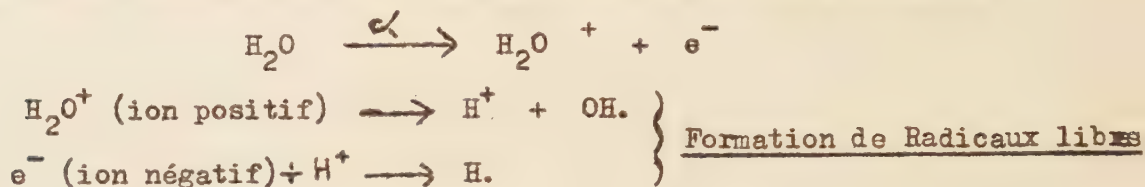
- soit arrachés et on dit que la molécule est ionisée (cas les plus fréquents),

- soit portés sur des orbites plus éloignées que la normale et on dit que la molécule est excitée.

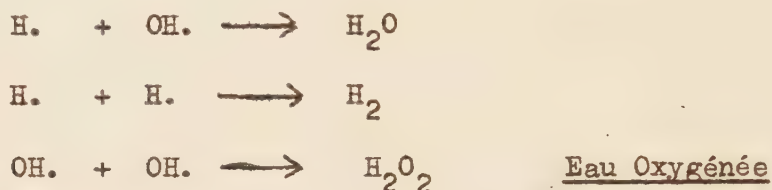
Le comportement de la molécule ionisée est celui que décrivent implicitement toutes les théories sur le mode de formation et d'action des radicaux libres et de l'eau oxygénée qui ont été émises jusqu'ici. Le comportement des molécules excitées, peu connu, n'a été évoqué que par les travaux de Burton, Magee et Samuel et constitue ce qu'on a convenu d'appeler "l'Hypothèse B.M.S."

a - Théorie de Weiss (1944) :

I - L'eau irradiée se décompose suivant la réaction suivante :



En se recombinant entre eux, ces radicaux - dont la durée de vie est $\leq 10^{-6}$ sec. - donnent :



2 - H_2O^+ a l'énergie de formation la plus faible (13 eV) parmi les ions formés par l'impact d'un électron sur de la vapeur d'eau. Ces autres ions suivraient l'ordre d'apparition des énergies croissantes des particules ionisantes :

H_2O^+ , H_3O^+ , OH^+ , O^+ , H^+ , H^- , O^- , OH^- ,
(ces six derniers en très petites quantités) ; mais la plus grande partie de l'énergie excédentaire, après formation de H_2O^+ , sert à faire passer les molécules d'eau à un état d'excitation.

3 - Le transporteur d'énergie ne serait pas la molécule solvante, mais les radicaux libres provenant de la décomposition de l'eau.

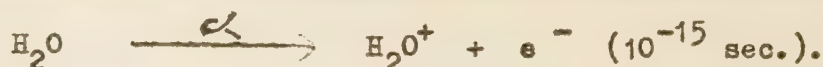
Cette théorie n'explique pas les variations observées entre les diverses radiations selon que l'eau contienne ou non de l' O_2 dissout.

b - Théorie de Lea et Gray (1947) modifiée par Lefort :

= CAS D'UNE IRRADIATION α :

Modifiant sensiblement le schéma initial de Weiss, Lea pense que :

I - Le produit direct de l'ionisation est une paire d'ions positif et négatif:



II - Ceux-ci se décomposeraient en s'hydratant pour donner les radicaux libres H. et OH. (ainsi que l'avait déjà proposé Risse) en 10^{-11} sec. : donc pas de diffusion importante.

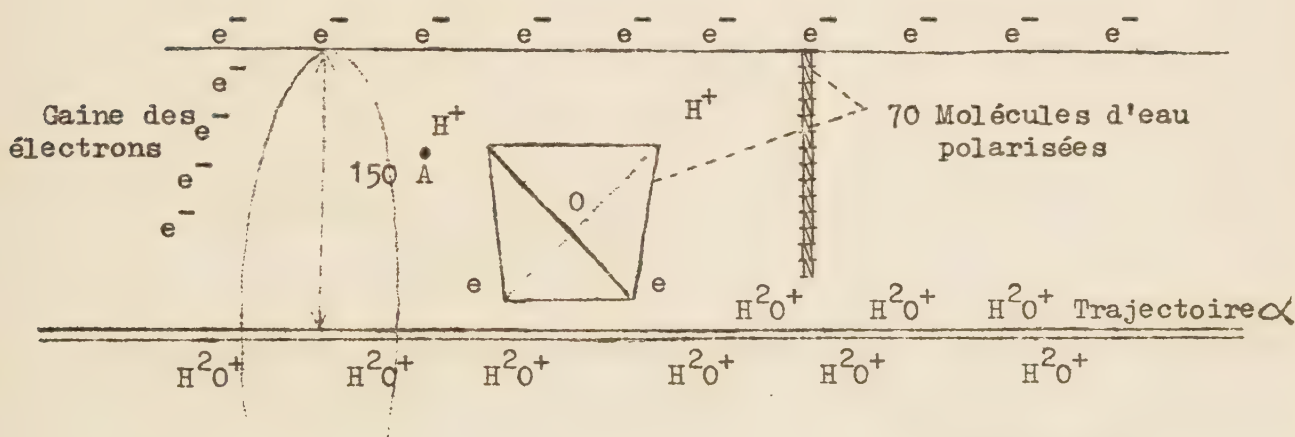
Les radicaux seraient émis aux lieux d'apparition des ions.

Dans ce mécanisme, les deux radicaux ne se forment pas l'un près de l'autre et, pour Lea l'électron effectue un parcours appréciable (à l'échelle moléculaire) avant de pouvoir être capturé par une molécule d'eau pour former un ion négatif (H_2O^-).

D'après Dale, Gray et Meredith, la distance séparant les radicaux dans l'eau serait, pour les radiations α , de l'ordre de 15μ ou $150 \text{ \AA}$, ce qui correspond à environ 70 molécules d'eau.

La formation des radicaux par étapes successives explique leur éloignement réciproque et le fait que leur probabilité de rencontre avant d'être captés par une molécule acceptrice est moindre que si ces radicaux avaient été formés simultanément et à courte distance l'un de l'autre (principe de la distribution inhomogène des radicaux libres).

Lea donne la représentation suivante des phénomènes :



Les ions positifs et négatifs se répartiraient d'une façon différente le long de la colonne d'ionisation :

- Près de la trajectoire de la particule α se forment les ions positifs H_2O^+ ;

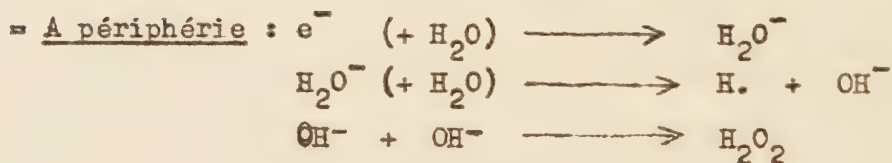
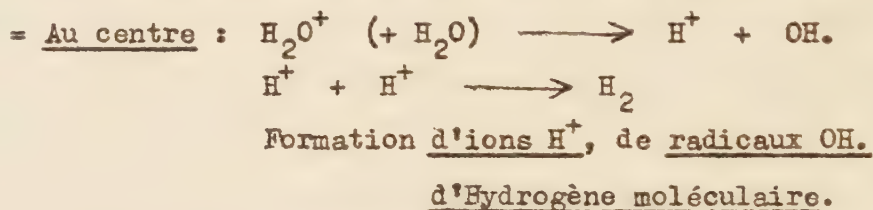
- tandis que les électrons éjectés à distance ($150 \text{ \AA}$), se distribuent en formant une gaine cylindrique concentrique,

- séparée de la colonne centrale d'ions H_2O^+ par les molécules d'eau non ionisées, mais polarisées par le champ électrique formé par les ions positifs et négatifs.

On peut schématiser la structure de cette molécule d'eau par un tétraèdre dont le centre est occupé par l'atome d'oxygène. Sur deux sommets se trouvent deux noyaux d'hydrogène de charge + ; sur les deux autres deux électrons du noyau d'oxygène.

La polarisation des molécules d'eau forme une gaine isolante entre les ions + de l'axe central et la gaine des électrons périphériques.

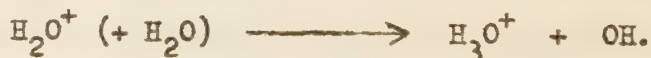
La réaction complète, selon Lea, serait la suivante :



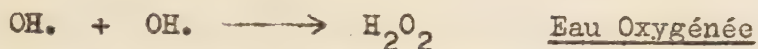
Formation d'ions OH^- , de radicaux H.
d'eau oxygénée.

III - Lefort donne une interprétation assez différente de l'action des ions H_2O^+ et e^- , tout en conservant la représentation spatiale de leur distribution après production de l'ionisation qu'en donne Lea.

= Les ions H_2O^+ (le long de la trajectoire $\propto$) ne peuvent diffuser que le long de l'axe où ils rencontrent des molécules d'eau :



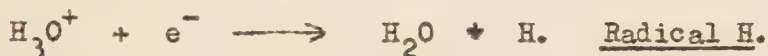
D'où grande concentration de radicaux OH., qui favorise la réaction :



et conduit au Peroxyde et à l'Oxygène moléculaire :



= Au bout d'un temps plus long (de l'ordre de 10^{-12} à 10^{-10} sec.) le champ électrique entre les électrons périphériques et les ions positifs centraux finit par vaincre les forces de polarisation. Les électrons de la gaine concentrique atteignent les ions positifs. Ils ne peuvent, comme le supposait Lea, être captés par une molécule d'eau pour donner un ion négatif H_2O^- , car celui-ci est instable et sa dissociation endothermique. Ils réagissent selon les réactions :



Les atomes H., dont la concentration est grande, vont au début réagir entre eux pour former de l'Hydrogène moléculaire, puis diffuseront à leur tour et rencontreront soit des radicaux OH., soit de l'eau oxygénée.

Finalement, les alentours de la trajectoire α auront été le siège d'une succession de réactions et de diffusions :

- qui ont produit une certaine concentration de radicaux OH. et H.
- et laissent en place une quantité importante :
 - d'eau oxygénée,
 - d'oxygène,
 - d'hydrogène moléculaire.

Lorsque l'eau irradiée est pure, ce sont effectivement ces produits que l'on observe.

La production de H_2O_2 , d' O_2 , et d' H_2 - dans le cas de l'eau pure - est proportionnelle à la dose absorbée, c'est-à-dire au nombre de particules α .

= CAS D'UNE IRRADIATION γ :

Les ionisations ou les excitations créées par les électrons très rapides de plusieurs centaines de KeV (eux-mêmes produits par effet photoélectrique, effet Compton et création de paires si l'énergie du photon incident atteint 10 MeV) sont extrêmement clairsemées. Seule la "fin" de la trajectoire produit une concentration ionique importante.



Deux ionisations consécutives créées sur la même trajectoire sont distantes de plusieurs microns : plusieurs centaines de molécules d'eau ne sont pas affectées. Cette distance est fonction de l'I.S.

Lorsque le débit de dose est élevé, la distance entre deux trajectoires est inférieure à la distance qui sépare deux ionisations sur la même trajectoire.

Chaque paire d'ions conduit à un radical OH. et à un atome d'H. ou un électron. Ces radicaux créés à quelques dizaines d'Å l'un de l'autre diffusent séparément à des vitesses différentes (H. est plus rapide que OH.) jusqu'à la rencontre de radicaux diffusant d'un autre point d'ionisation. Les trajectoires s'enchevêtrent de telle façon, que la solution est homogène en radicaux libres et la concentration faible.

Dans ces conditions, on voit que dans l'eau pure les chances de combinaisons entre radicaux de même nom :



sont très faibles, puisque les concentrations en H. et en OH., sont les mêmes et que la réaction $\text{H.} + \text{OH.} = \text{H}_2\text{O}$ est plus rapide, du fait de l'affinité réciproque de ces deux radicaux.

Rôle des rayons δ : Il convient de noter que les électrons éjectés avec une certaine énergie cinétique lors de l'ionisation primaire peuvent à leur tour créer des ionisations secondaires. Ils constituent un rayonnement δ dont l'énergie est comprise entre 10 et 1.000 eV. Or ces particules légères peuvent provoquer une ionisation aussi dense que celle des rayons α au moment de leur ralentissement : ionisation "en grappe" qui conduit au rapprochement des radicaux de noms différents et favorise leur combinaison en H_2O_2 et H_2 . (Même l'addition de solutés très avides de radicaux OH. et H. ne peut supprimer ces combinaisons).

H_2O_2 et H_2 diffusent alors dans la solution, mais, contrairement au cas des rayons α , ne subsistent pas, car ils sont entièrement détruits par les radicaux formés par 80 à 90 % des ionisations et répartis uniformément :



En définitive, l'irradiation γ de l'eau pure - même si cette irradiation est considérable - ne produit donc :

- ni Eau Oxygénée,
- ni Hydrogène moléculaire,
- ni Oxygène.

Ou du moins les concentrations sont infimes, imperceptibles.

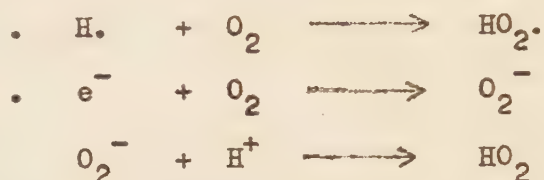
= RÔLE ET IMPORTANCE DE L'OXYGÈNE DISSOUS :

1 - Sur l'irradiation de l'eau :

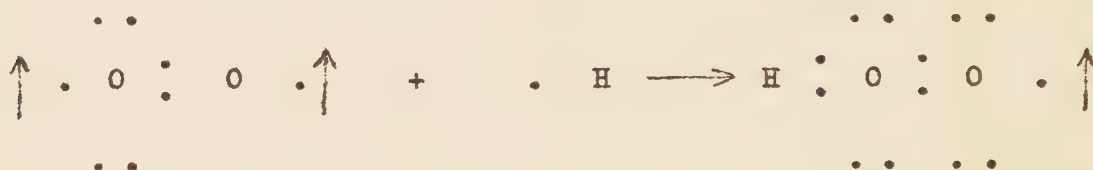
Nous avons vu que les travaux de Fricke, puis ceux de l'école française (Latarjet, Loiseleur, Bonnet-Moury, Lefort) ont mis en évidence l'importance de l'oxygène dissous dans le mécanisme d'action des radiations ionisantes sur l'eau : pour une même irradiation X ou γ la quantité d'eau

oxygénée dépend directement de la concentration d' O_2 dissous ; dans le cas des rayons γ , au contraire, cet oxygène dissous ne semble jouer aucun rôle.

La raison essentielle de l'importance de l'oxygène dissous dans les phénomènes d'oxydation par les rayonnements ionisants vient du fait que la molécule d'oxygène réagit très facilement soit avec l'hydrogène atomique, soit avec un électron :



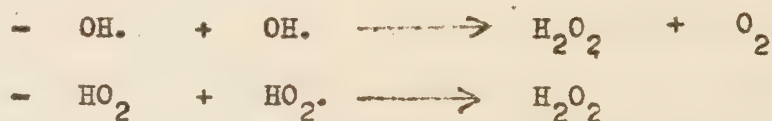
La molécule d'oxygène contient deux électrons non appariés à spins de même signe : elle se comporte comme un radical double :



La capture d'un électron d'H. ou d'un électron libre conduit à un radical (monoradical) peroxydé HO_2 .

Ainsi, tandis que l'eau pure irradiée contient un mélange de radicaux oxydants ($OH\cdot$) et réducteurs ($H\cdot$), dont les effets s'annulent ($H\cdot + OH\cdot \rightarrow H_2O$) s'ils ne peuvent diffuser (cas de l'irradiation X ou γ), l'eau irradiée à l'air contient seulement un mélange d'oxydants $OH\cdot$ et HO_2 .

En définitive, l'eau irradiée à l'air aura une production d' H_2O_2 , par suite des réactions :



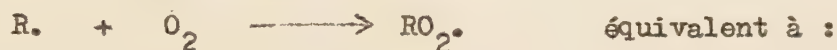
Les atomes d'hydrogène, captés par O_2 , ne pourront plus détruire les molécules de H_2O_2 .

2 - Sur la formation des peroxydes et le post-effet :

Anticipant quelque peu sur ce qui suivra, nous décrirons également le rôle particulier que joue l'oxygène dans la formation des peroxydes organiques.

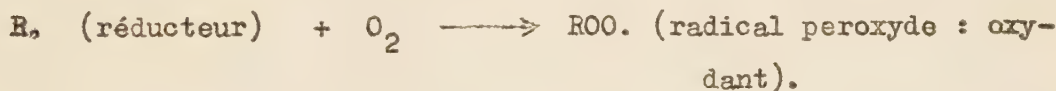
Nous avons vu que l'hydroxylation est une des caractéristiques les plus nettes des effets des rayonnements ionisants sur les composés organiques en solution aqueuse (hydroxylation du Benzène en Phénol par exemple) et que la présence d'oxygène dissous dans la solution multiplie le rendement de la réaction.

De même que l'oxygène moléculaire, réagissant comme un biradical, tend à se fixer avec prédilection sur le radical H., de même cette molécule réagit aisément avec les radicaux organiques :

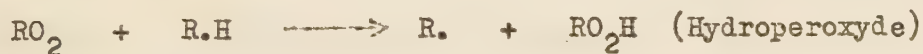


pour former un Radical Peroxyde ROO., qui amorce une série de réactions en chaîne.

A partir d'un composé organique cela entraîne :



On voit que l'importance du rôle de l'Oxygène vient de ce que celui-ci permet la transformation d'un radical réducteur R. en un radical peroxyde qui est un oxydant puissant.



Le radical R. est reformé par destruction de R.H et, avec O₂ :



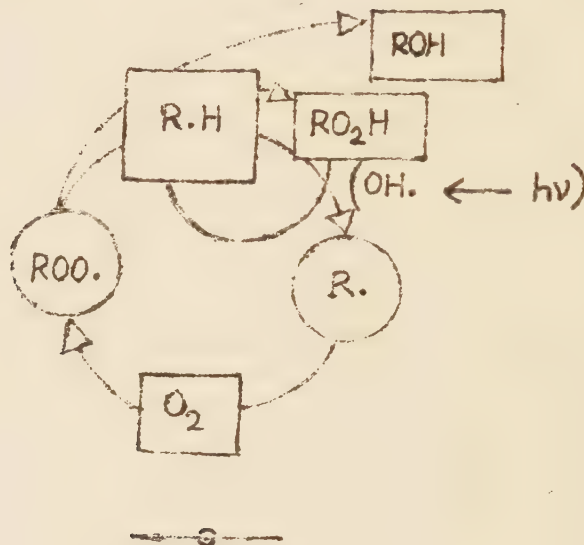
Ce cycle de R. nous explique que pour un seul quantum d'énergie absorbée, il y ait production d'une grande quantité de peroxydes (1.000 molécules de peroxydes pour une seule ionisation d'après Philpot).

La chaîne amorcée se termine le plus souvent par la formation d'un composé hydroxylé :



Ces peroxydes subsistent après irradiation et continuent de réagir sur les molécules R.H pour donner des composés hydroxylés : on observe donc un effet prolongé de l'irradiation ou Post-effet.

On peut schématiser cette cascade de réactions de la manière suivante :



- RENDEMENT DES IRRADIATIONS DE L'EAU PURE SUIVANT LA NATURE DU RAYONNEMENT INCIDENT :

Le rendement des réactions produites par une dose donnée de radiations peut s'exprimer de deux manières :

- 1 - Le Rapport M/N : c'est le nombre de molécules (M) transformées ou produites par paire d'ions (N).
- 2 - Le Facteur G : C'est le nombre de molécules transformées ou produites par l'absorption d'une énergie de 100 eV.

- Dans le cas de l'irradiation de l'eau pure par un rayonnement γ on peut observer le rendement en Eau Oxygénée et Hydrogène moléculaire, si l'on introduit en solution diluée un ou plusieurs corps dissous capables de capter les radicaux OH. et H. ou les rayons δ (électrons lents). Les solutés "protègent" alors l'Eau Oxygénée et l'Hydrogène. On a ainsi défini :

- un rendement initial de production de radicaux libres (captés par le corps dissous) ;

- un rendement d' H_2O_2 et H_2 produits par les "grappes" d'ionisation δ :

$$G(-G_{H_2O}) = G_{H.} + 2 G_{H_2} = G_{OH.} + G_{H_2O_2}$$

$$G(-G_{H_2O}) = \text{Rendement Global de décomposition de l'eau pour 100 eV}$$

- Dans le cas des rayons α , il faut ajouter G_{HO_2} provenant de la réaction $H_2O_2 + OH. \longrightarrow HO_2$ qui se déroule au voisinage de la trajectoire α :

$$G(-G_{H_2O}) + G_{H.} + 2 G_{H_2} = G_{OH.} + 2 G_{H_2O_2} + G_{HO_2}$$

Voici résumées les valeurs trouvées pour ces rendements, lorsqu'on utilise des solutés acides :

Radiations	eV / Å	$G_{H_2O_2}$	$G_{OH.}$	$G_{H.}$	G_{H_2}	G_{H_2O}	G_{HO_2}
γ (Cobalt)	0,02	0,80	<u>2,95</u>	<u>3,65</u>	0,45	4,60	
δ (10 eV)	0,40	1	2,20	2,90	0,65	4,20	0,02
α (Polon.)	14	<u>1,36</u>	0,40	0,60	<u>1,56</u>	3,52	0,20

(d'après M. Lefort)

c - Théorie d'Allen dite "Radical Reaction" :

Allen pense que la répartition spatiale des radicaux ne serait pas aussi différenciée que le suppose la théorie de Lea :

= L'ionisation X ou γ présenterait, en certains points une distribution analogue à celle des rayons α ;

= Inversement, une particule α se comporterait en certains points comme un rayonnement électromagnétique.

d - Hypothèse B.M.S. :

D'après l'hypothèse de Burton, Magee et Samuel, les radicaux libres seraient seulement fournis par les molécules d'eau excitées, dont il se forme deux types : M et M'.

= Les molécules M apparaissent lors de l'excitation primaire (temps équivalent à l'ionisation).

On sait que cette activation se produit lorsqu'un électron d'une orbite (d'un des atomes de la molécule) absorbant un photon, acquiert un surcroît d'énergie qui lui permet de se tenir sur une orbite de satellisation plus éloignée du noyau. L'énergie absorbée n'est alors que de quelques eV.

Ces molécules excitées ne peuvent retourner à un état stable que :

- par chute de l'électron sur une orbite plus centrale (il se produit alors une émission de rayonnement X) ;

- ou par rupture d'une liaison chimique : dans ce dernier cas chaque molécule d'eau excitée se dissocie en produisant deux radicaux libres, selon :



En fait, ces molécules ne donnent pas de radicaux libres :

- soit parce qu'elles perdent leur énergie avant que puisse se produire la dissociation (il y a alors chute de l'électron sur une orbite plus centrale) ;

- soit parce que les radicaux formés se combinent immédiatement entre eux : leur énergie est insuffisante pour qu'ils puissent diffuser, s'échapper de la "cage".

La vie de ces molécules est assez longue (10^{-5} sec.) pour leur permettre d'entrer en réaction chimique, encore qu'elles aient une réactivité assez faible.

= Les molécules M' sont produites par neutralisation de chargés :

Au cours des ionisations antérieures, se sont formés des ions positifs selon la réaction :



L'électron éjecté, nous l'avons vu, peut selon l'intensité de l'énergie que lui a transférée la radiation ionisante absorbée :

- soit produire un rayonnement γ ,
- soit se thermaliser (son énergie sera alors faible, de l'ordre de 0,1 eV).

Cet électron thermalisé peut alors :

- soit se faire capturer par une autre molécule et former un ion négatif :



- soit se faire capturer par un ion positif : c'est cette réaction qui aboutit à la neutralisation des charges, en libérant une très grande énergie :



Les molécules M' correspondent donc à ces néo-molécules de grande énergie qui, après excitation, se dissocieront - par rupture de liaison chimique - en formant des radicaux libres :



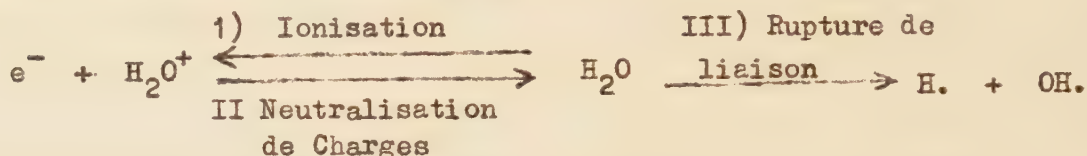
La grande énergie cinétique transférée à ces radicaux leur permet de s'échapper de la "cage"

(1) On a vu que Lefort estime que l'électron ne peut pas être capté par une molécule d'eau car l'ion H_2O^- est instable et sa dissociation endothermique.

(2) Classiquement, l'ion H_2O^+ est stable en phase gazeuse, mais se dissocie en phase liquide.

D'après B.M.S., l'ion H_2O^+ refixerait l'électron éjecté avant qu'il n'ait eu le temps de diffuser hors de portée.

On peut donc schématiser cette théorie, en ce qui concerne les Molécules M', de la manière suivante :



e - Comparaison des théories de Lea et de B.M.S. :

1 - Dans tous les cas la réaction globale serait :



2 - La distance entre la formation de deux molécules successives M', pour B.M.S., entre la formation de deux radicaux, pour Lea, varie toujours avec l'ionisation spécifique de la radiation.

3 - La différence essentielle entre ces deux théories concerne, on le voit, le comportement de l'électron thermique éjecté après ionisation d'une molécule d'eau :

- Pour B.M.S., cet électron ne diffuse pas, car son énergie cinétique $\leq 0,01$ eV est trop faible : il ne peut quitter la "cage".

- Pour Lea et Gray, cet électron lent possède une énergie cinétique suffisante pour échapper à l'attraction coulombienne et lui permettre d'accomplir un libre parcours ($150 \text{ \AA}$) avant d'être capturé pour donner un ion négatif.

- Pour Lefort, l'ion H^+ - provenant de la dissociation légère de l'eau même pure : $H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$ - capterait cet électron pour former, par neutralisation de charges, un atome d'hydrogène.

Les données expérimentales actuelles semblent insuffisantes pour arbitrer ces points de vue.

4 - Les deux mécanismes conduisent à une distribution différente des radicaux qui aura une influence déterminante sur les effets chimiques produits par les radiations fortement ionisantes (X ou γ mous, α).

- Dans le cas de la théorie de Lea, les radicaux apparaissent au lieu même de la formation des ions. On rencontre le long d'une trajectoire linéaire α ou β :

. près de la trajectoire : OH., H^+ , H_2 .

. à distance et concentriquement : H., OH^- , H_2O_2 .

La distribution des radicaux est dite inhomogène.

- Dans le cas de la théorie de Lefort, ces corps ainsi que l'oxygène se formeraient tout le long de la trajectoire à des temps différents.

- Dans le cas de la théorie de B.M.S., les radicaux H. et OH. sont localisés le long des trajectoires et mélangés au hasard.

N O R M E S D E P R O T E C T I O N

E T

S E C U R I T E D E S R E A C T E U R S

Les buts fondamentaux de la protection contre les radiations ionisantes sont de 3 sortes :

I - La Sécurité Individuelle : elle consiste à assurer d'abord la survie du travailleur de l'industrie atomique ou d'autres installations nucléaires, et à prévenir l'apparition d'effets somatiques et génétiques chez tout membre du personnel "en contact direct" avec les sources de radiations ionisantes.

Elle se confond pratiquement avec la sécurité professionnelle.

II - La Sécurité de la population : en dehors de la prévision des risques d'accidents de réacteurs ou de fuites importantes des déchets à longues périodes entreposés dans certains milieux isolés, la sécurité des populations repose essentiellement sur les mesures adoptées pour limiter les possibilités d'apparition tardive de cancers et d'hémopathies induits par les radiations ionisantes, c'est-à-dire sur la protection contre les effets somatiques retardés de celle-ci.

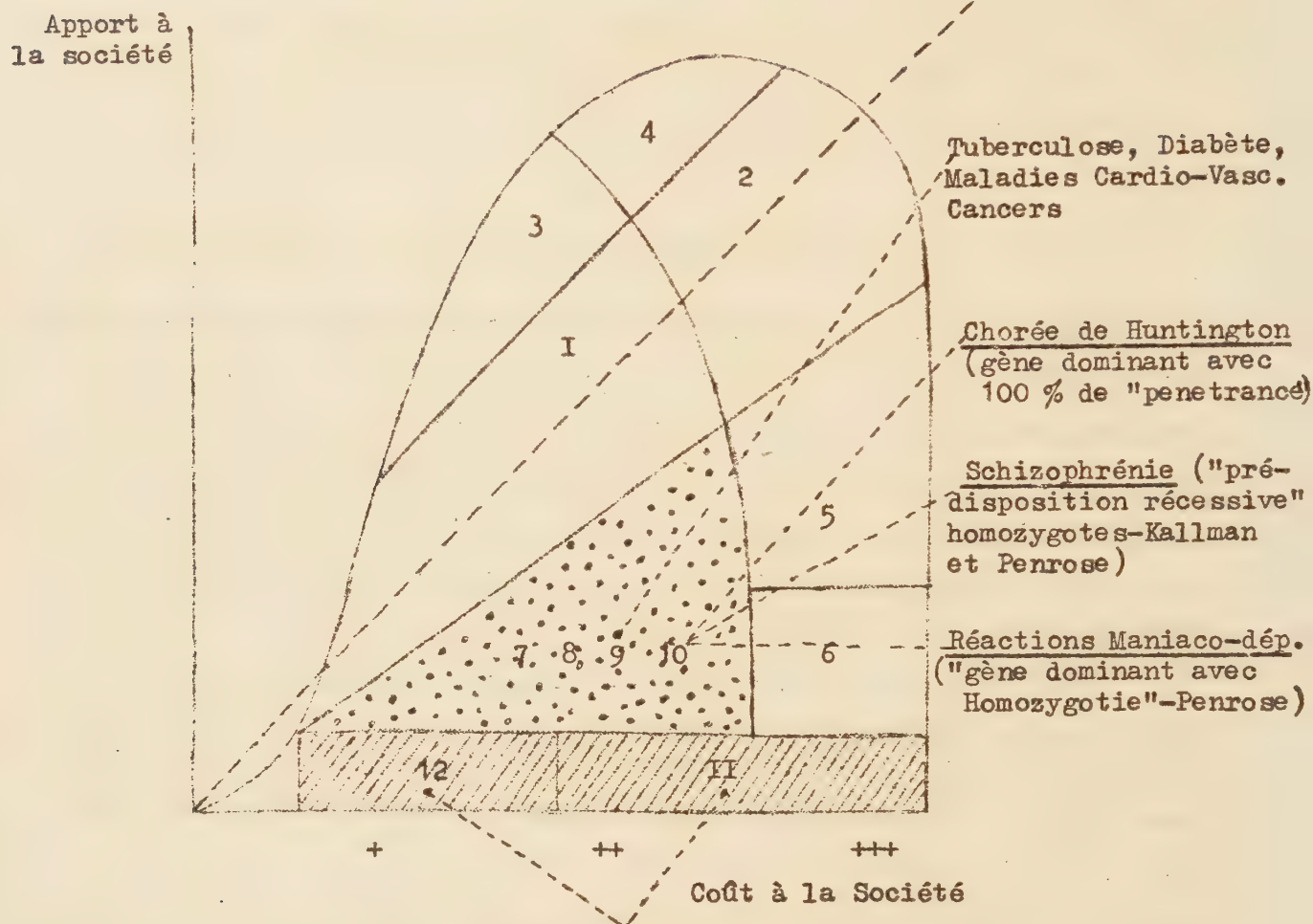
Une fois écartés les dangers inhérents à des cataclysmes improbables, la sécurité de la population sera réalisée si l'on parvient à limiter pour le présent et l'avenir le "fardeau somatique" de la société, c'est-à-dire le pourcentage de leucémies, d'hémopathies graves ou de cancers induits par les radiations ionisantes.

III - La Sécurité de l'Espèce : a en vue la limitation du fardeau génétique de notre société.

Pour donner un aperçu de ce que pourrait représenter ce fardeau pour une société organisée, nous reproduirons le diagramme de Sewall Wright (National Academy of Sciences - 1960) en n'en retenant que sa valeur représentative, aucune donnée statistique ne pouvant être fournie dans les circonstances actuelles, sauf peut-être dans de très rares cas "favorables".

La bissectrice correspond à un équilibre idéal entre l'apport fait à la société par un groupe humain "sans densité appréciable" et le coût occasionné à la société par ce même groupe. Selon que les taux de l'apport et du coût se font à des niveaux bas ou élevés le groupe intéressé sera rapproché ou éloigné de l'origine des abscisses et des ordonnées.

Wright classe la société, sous le rapport "coût-apport", en 13 groupes :



"Les effets d'une augmentation des R.I. sont dans ce groupe plus probables que dans n'importe quel autre groupe" (Wright)

DIAGRAMME DE SEWALL WRIGHT (U.S. National Academy of Sciences - 1960)

Groupes 1, 2, 3, 4 = Groupes en équilibre : 1 et 2 représentent la majeure partie de la société. 3 et 4 représentent l'élite : leur apport est supérieur aux dépenses qu'ils ont occasionnées à la société.

Groupe 5 : Les individus de ce groupe ont des capacités équivalentes à ceux des groupes 1, 2 ou même 3 et 4, mais leur état de santé déficient fait qu'en définitive ils coûtent à la société plus qu'ils ne lui apportent.

Groupe 6 : Dans ce groupe sont compris les individus qui ont des capacités physiques et mentales normales, mais qui coûtent beaucoup à la société, en raison de leur comportement social : charlatans, criminels. A leur propos s'élèvent de nombreuses controverses sur l'influence respective du milieu et de la constitution héréditaire. On peut penser que notre civilisation a provoqué une sélection à rebours et "qu'ils n'auraient rien coûté à une société primitive". Les effets d'une augmentation des radiations ionisantes sur l'accroissement de ces caractères est mal compris.

Groupes 7 à 12 : Ce serait dans ces catégories que l'accroissement du fardeau génétique du fait des radiations ionisante serait le plus sensible.

- 7 - Individus dont la santé et la constitution physique sont subnormales.
- 8 - Individus dont le niveau mental est bas, mais qu'il n'est pas nécessaire de complètement assister.
- 9 - Individus dont l'abaissement des possibilités physiques est consécutif à un accident ou à une maladie chronique ou maligne (tuberculose, Diabète, Maladies cardio-vasculaires, Cancers). L'incidence génétique peut être sensible dans ce groupe.
- 10 - Psychoses après l'âge d'adulte : l'hérédité joue un rôle important dans ce groupe.

- La chorée de Huntington est due à un gène dominant qui peut apparaître après une mutation, même avec hétérozygotie.

- La Schizophrénie : Kallman et Penrose pensent qu'il s'agit d'une "prédisposition récessive" et que l'incidence des homozygotes récessifs atteint 1 % de la population. 10 % des sujets atteints présenteraient une réduction de 50 % de la fécondité.

- Les réactions maniaco-dépressives : Penrose pense que la prédisposition aux R.M.D. est due à un gène dominant et que la fréquence de l'homozygotie est de 0,5 % de la population ; 14 % de ces sujets auraient une réduction de fécondité de 10 %. Le taux de mutations, dans ce cas serait de l'ordre de 35×10^{-6} .

11 - Incapacité mentale ou physique totale durant toute une vie longue.

12 - Mort avant la maturité : leur apport à la société est insignifiant.

"Les effets d'une augmentation des radiations ionisantes sont dans ces groupes plus probables que dans n'importe quel autre groupe" (Sewall Wright).

Groupe 13 : Morts-nés ou morts in Utéro. L'incidence génétique est non négligeable dans ce groupe, mais il coûte peu à la société.

L'influence des radiations ionisantes sur la fécondité peut soit coûter soit être un apport à la société selon que ces modifications augmentent les groupes du dessous ou du dessus de la bissectrice.

L'influence des radiations sur le "sex-ratio" (augmentation des mâles) n'intervient pas dans l'évaluation du fardeau génétique.

La sécurité individuelle s'inspire de données assez clairement définies. Les moyens mis en oeuvre pour la rendre effective sont concrets, immédiats, directs, individuels autant que collectifs et se basent sur des normes de protection "recommandées" rigoureusement respectées, sauf en cas de force majeure (irradiation exceptionnelle concertée, accidents). Ce sont des concentrations maximum admises (ou doses maxima admissibles = D.M.A.). Celles-ci sont prévues en tenant compte de toutes les possibilités d'irradiation de l'homme (voies externe et interne, dose unique ou répétée, organe critique atteint ou irradiation de tout le corps, etc...) et en raison des possibilités de contamination du milieu : "Les D.M.A. recommandées dans les congrès de l'I.C.R.P. et de la N.C.R.P. sont établies en tenant compte des dommages directs causés par les radiations ionisantes à l'homme (susceptibilité aux maladies, leucémies raccourcissement de la durée de vie), et aux générations futures (dommages génétiques), mais aussi en tenant compte de leurs effets écologiques sur l'environnement, c'est-à-dire leur influence sur les complexes alimentaires" (L.Z. Morgan).

La sécurité de la population et de l'espèce, lorsqu'il ne s'agit pas de faire face à l'éventualité d'accidents exceptionnels, reposent sur des prévisions mal éclaircies, sur des probabilités plutôt que sur des

certitudes (1). Il est toutefois supposé que la relation dose-effet (somatique) pour des doses d'exposition basses (ce qui est presque toujours le cas dans les circonstances où la population dans son ensemble est irradiée) ne comporte pas de seuil ("nonthreshold linear-effect relationship") et qu'en conséquence les plus petites doses comportent quelques risques, tandis que les doses absorbées sont toutes cumulatives. (Comité ad hoc du N.C.R.P. - Mai 59).

Les mesures adoptées n'ont pas d'incidence individuelle directe ; elles s'inspirent et apportent à leur tour quelques éclaircissements à des disciplines qui s'appuient sur des données statistiques (radioécologie, radio-épidémiologie, génétique, carcinologie). La protection des populations consiste donc en fin de compte à contrôler la pollution globale de l'environnement en espérant ainsi maintenir aux taux souhaités l'irradiation collective moyenne des organes critiques tels que les gonades ou les tissus hématopoïétiques : "Il est admis que les C.M.A. dans les milieux tels que les aliments, l'eau, l'air, pourront être maintenus de telle manière que la dose d'irradiation - compte non tenu des doses d'exposition naturelle ou médicale - pour une personne "typique de l'environnement" n'excèdera pas une dose maximum appropriée" (Comité Ad Hoc de la N.C.R.P. - Mai 1959). Cette dose appropriée - toujours d'après ce Comité - devant être telle, que l'ensemble des doses dispersées par les sources artificielles de radioactivité devrait seulement doubler, pour la population, la dose reçue des sources naturelles. Les normes de protections "suggérées" par l'I.C.R.P. ne font qu'exprimer l'espoir que si ces normes pour l'ensemble de la population sont en moyenne respectées (grâce au maintien d'une faible radioactivité dans le milieu environnant) celle-ci voit ses chances augmenter d'équilibrer ses besoins économiques ou sanitaires et son fardeau somatique et génétique : "les estimations faites par différents corps scientifiques nationaux (c'est-à-dire américains) et internationaux indiquent qu'une dose gonadonale per capita de 6 à 10 rems accumulée de la naissance à trente ans, dissipées par toutes les sources créées par l'homme imposeraient un fardeau considérable à la société du fait des dommages génétiques, mais ce

(1) Dans ce domaine, nous adoptons par sagesse l'attitude du fou de Windell Johnson qui ne sait rien mais adopte une réponse : "A fool is one who knows nothing but answers - while the wise man knows what the questions are".

fardeau devrait être considéré comme tolérable et justifié par les bénéfices ... " (ICRP). "Si cette dose dépassait 10 rems/30 ans, cela entraînerait probablement des risques non compensés par les avantages" (Morgan). Ces normes ne correspondent pas ici à des limites maxima admissibles mais à des doses moyennes E.B.R. et sont destinées à une "personne typique de l'environnement", c'est à dire doivent être satisfaites statistiquement. Elles peuvent donc ne pas être respectées dans les cas isolés, mais cela explique qu'elles peuvent être révisées - comme elles l'ont été en 1959 - en fonction de trois facteurs importants :

1 - L'accroissement de l'exploitation de l'énergie nucléaire et l'extension de son utilisation à des domaines nouveaux ("Flowshare Program").

2 - L'accroissement du nombre de personnes employées par les activités atomiques, qui provoque une augmentation globale des doses absorbées par l'ensemble de la population.

3 - L'accroissement des indications d'ordre médical, que pourraient compenser de meilleures techniques (rayons pénétrants, protection des gonades, films plus rapides, etc...) et des prescriptions mieux appropriées (peu d'examens radioscopiques, abstention chez la femme enceinte et de moins de trente ans ou tout au moins éviter les clichés de bassin, de même chez l'enfant et surtout la petite fille).

On notera enfin que ces normes seront suggérées avec d'autant plus de prudence que nous ignorons les conséquences et les mécanismes de l'action des radiations ionisantes sur notre patrimoine héréditaire. Seule la dose de duplication, d'ailleurs diversement évaluée, semble actuellement pouvoir être considérée comme un guide assez sûr.

LES NORMES DE PROTECTION DE L'I.C.R.P.

Pour asseoir cette sécurité tant individuelle que collective sur des bases aussi rationnelles que possibles, c'est-à-dire tenant compte aussi bien des conditions biologiques que des besoins économiques d'une nation moderne, l'ICRP et la NCRP ont proposé des normes de protection qui visent à favoriser la prophylaxie à trois échelons différents. Ces deux organismes ont ainsi établi :

- des normes primaires de base,
- des normes secondaires,
- des normes tertiaires.

= Les Normes Primaires de Base donnent la dose maximum admise pour une irradiation du corps "in toto" et pour les différents tissus de l'organisme, selon les divers types d'exposition.

= Les Normes Secondaires se rapportent à la contamination radioactive de l'homme et de son environnement. Elles fournissent les relations qui - par mesures ou par calcul - permettront d'aboutir à des données en conformité avec les normes de base.

= Les Normes Tertiaires se rapportent au personnel, aux constructions, à l'équipement et pourvoient aux règles, techniques, procédés qui permettront de respecter les normes primaires et secondaires.

On voit que les normes primaires de base et les normes tertiaires répondent aux besoins de la sécurité professionnelle, tandis que les normes secondaires intéresseront davantage la population. En réalité l'ensemble de ces normes auront une répercussion sur l'ensemble de la population et sur la prophylaxie individuelle, puisqu'il s'agit dans tous les cas de respecter les normes de base.

Sur un autre plan, l'ICRP distingue, pour fixer ses normes, cinq catégories de personnes :

A - Les travailleurs occupant un emploi dans l'enceinte d'une installation utilisant l'énergie nucléaire.

B_a - Les travailleurs séjournant dans le voisinage de ces installations.

B_b - Les visiteurs occasionnels pénétrant dans l'enceinte de ces installations.

B_c - Les personnes habitant à proximité des sites nucléaires.

C - L'ensemble de la Population .

Le groupe A représente les travailleurs de l'énergie atomique ou de toute organisation utilisant des corps radioactifs. Le groupe C représente l'ensemble du public, c'est-à-dire le groupe pour lequel aucune mesure de contrôle individuel n'est possible. Le groupe B est un groupe intermédiaire dont l'importance numérique est de 3,3% de la population (aux U.S.A.) ; sa caractéristique est qu'il comprend (B_c) des femmes enceintes et des enfants, ainsi que des personnes de moins de 18 ans. Le groupe A occupe une zone contrôlée (contrôle fréquent des doses absorbées et de la contamination de l'environnement et examens médicaux hebdomadaires) ainsi que le groupe B_b. Le reste du groupe B occupe une zone surveillée (contrôles radioactifs, mais pas de contrôle médical).

Il existe une grande différence de conception de la prophylaxie entre les groupes A (travailleurs) et C (population) : nous en avons donné les caractéristiques principales à propos des notions de sécurité individuelle, de la population, de l'espèce. La situation dans l'espace et dans la société de ces groupes les oppose également :

- L'ensemble de la population constitue une collectivité beaucoup plus importante numériquement que celles des personnes professionnellement

exposées. Exposée, sans contrôle aux mêmes doses d'irradiation que les travailleurs, il va de soi que les dommages seraient globalement et proportionnellement plus importants.

- Les travailleurs se sont volontairement placés dans une position où existent des possibilités de risques ; le reste de la population subit inconsciemment l'irradiation naturelle et artificielle qui l'atteint.

- Parmi la population les enfants et les femmes enceintes sont particulièrement vulnérables.

- Le temps total d'exposition des travailleurs est beaucoup moins long (aux D.M.A. dans leur cas) que celui de la population.

De tout ceci, il découle deux conséquences majeures :

1 - Les normes "suggérées" pour une "personne typique de l'environnement" d'une population seront 100 fois inférieures à celles qui sont "recommandées" pour les travailleurs professionnellement exposés. Pour les personnes du groupe B - sauf pour le groupe B_c assimilé à l'ensemble de la population - les normes "recommandées" seront 10 fois inférieures à celles des personnes professionnellement exposées.

Cette règle est observée aussi bien par l'I.C.R.P. que par la N.C.R.P. Cependant Rolf M. Sievert (Chairman de l'I.C.R.P. en 1950 - Suédois) et K.Z. Morgan font remarquer qu'il serait plus rationnel d'établir d'abord les doses E.B.R. pour l'ensemble de la population et d'affecter ensuite celle-ci d'un coefficient 100 pour fixer les doses moyennes E.B.R. pour les personnes professionnellement exposées, ce qui permettrait de se conformer aux normes primaires suggérées pour l'exposition gonadale de l'ensemble de la population.

2 - Les effets retardés des radiations ionisantes n'auront, pour des raisons statistiques, de valeur significative que s'ils atteignent un certain pourcentage de cette population : ce sont donc essentiellement l'étude de la prophylaxie de ces effets qui préoccupera la protection de la population (la prophylaxie individuelle en tient compte également). Et toute cette prophylaxie tendra à ce que soit respectée la dose gonadale E.B.R. moyenne - 30 ans qui constitue la norme fondamentale de la protection des

populations. Nous verrons que si elle n'est pas dépassée par "la personne typique de l'environnement", cela entraîne également le respect de la norme - organes hématopoïétiques puisque celle-ci est supérieure à la dose gonadale E.B.R. moyenne-lan et que ces deux normes s'appliquent respectivement à l'irradiation de tout le corps considéré comme l'organe critique.

Nous donnons dans le tableau 1 l'ensemble des normes fixées par l'I.C.R.P. lors de son dernier congrès de Munich en 1959.

Ce tableau appelle les remarques suivantes :

1 - Pour chacune des catégories énumérées, sauf pour l'ensemble de la population, l'I.C.R.P. a "recommandé" une dose E.B.R. moyenne et les valeurs des D.M.A. correspondantes soit pour une irradiation gonadale (l'ensemble du corps étant assimilé à l'organe critique, les doses gonadales sont identiques aux doses pour une irradiation in toto), soit pour une irradiation des autres organes. Mais ni l'I.C.R.P. (ni la N.C.R.P.) n'ont "recommandé" de doses E.B.R. pour l'ensemble de la population ; l'I.C.R.P. a seulement "suggéré" ces doses que la N.C.R.P. n'a pas encore confirmées. "Ce choix de mots est délibéré et correspond au degré de rigueur ou d'incertitude avec lequel on a pu déterminer ces valeurs" (K.Z. Morgan).

2 - Toutes les doses E.B.R. précédemment citées sont admises en supplément des doses d'exposition d'origine naturelle ou médicale, lesquelles varient avec les différents pays. Une adaptation selon la région intéressée est donc chaque fois nécessaire.

En ce qui concerne la dose gonadale "il faut aussi mettre en relief que ce n'est pas exactement le chiffre de 5 rems/30 ans que nous faisons intervenir dans nos prévisions à longue échéance pour l'exposition d'une large couche de la population, mais la dose totale d'exposition 10 rems/30 ans" (K.Z. Morgan).

3 - Pour la protection de la population, bien que d'autres normes aient été données, que nous reproduisons dans le tableau III, il convient de retenir l'expression des deux normes fondamentales : la dose E.B.R. gonadale moyenne et la dose E.B.R. tissu sanguin moyenne.

a - La dose gonadale moyenne E.B.R. pour l'ensemble de la population suggérée par l'I.C.R.P. peut s'interpréter, selon le temps et le mode d'irradiation de la manière suivante :

- Dose E.B.R. moyenne-trente ans : 5 rems. Le tableau II donne sa répartition suivant les sources. La dose-année est de 0,17 rems.

- Si l'irradiation est interne, cette valeur sera : (5 rems/30 ans
1,5 rems/30 ans ou 0,05 rem/année.

3

- On remarquera que le ~~facteur~~ 1/100 ne peut affecter que la D.M.A. pour une personne professionnellement exposée, lorsque celle-ci a subi 168 heures d'exposition et que les gonades (ou tout le corps) constituent l'organe critique. Dans ces conditions, on voit que la dose gonadale moyenne-trente ans pour l'ensemble de la population s'obtient aussi en partant de la dose gonadale pour une personne professionnellement exposée (5 rems/année):

$$5 \text{ rems/année} \times 1/100 = 0,05 \text{ rem.}$$

Les dommages génétiques dépendent directement de la dose gonadale moyenne-30 ans : la relation dose-effet ne comporte pas de seuil et les doses absorbées sont cumulatives.

b - La dose E.B.R. moyenne suggérée pour une irradiation de tout le corps lorsque l'organe critique est le tissu hématopoïétique (ou le cristallin ou dans le cas de mélange de radioéléments) pour l'ensemble de la population est de 0,5 rem/an.

"L'incidence leucémique et le raccourcissement de la vie sont communément en relation directe avec la dose E.B.R. pour tout le corps, de la même manière que les dommages génétiques dépendent directement de la dose gonadale E.B.R." (K.Z. Morgan).

Il est très possible que quelques pays qui ont une exposition médicale moyenne de 2,5 rems/30 ans s'efforcent d'éviter d'atteindre les 5 rems/30 ans (avec protection des gonades) pour l'exposition médicale tolérable suggérée par l'I.C.R.P., ce qui permettrait une plus grande souplesse dans la protection des populations contre les R.I. Il peut donc y avoir une permutation dans les valeurs suggérées au Tableau II.

4 - Enfin nous reproduisons dans le tableau IV, les modifications successives des normes pour une large couche de populations, depuis 1952. A titre de comparaison, nous donnons le tableau des variations des normes, pour une personne professionnellement exposée, depuis 1934. (Il ne faut pas perdre de vue que, sur le plan économique, les modifications de ces normes ont une extrême importance, puisqu'il s'est avéré que la division par 3 des normes pour une personne professionnellement exposée, entraînait une multiplication par 3 du coût du kilowatt d'énergie. Mais "en ce qui concerne les radiations, on a décidé de minimiser les risques à presque n'importe quel prix" (Shields Warren).

Pour imposer cet abaissement important des normes pour l'ensemble de la population, l'I.C.R.P. s'est basée sur les arguments que nous avons développés aux pages 52 et 54 d'une part, et sur l'ignorance presque complète de nos connaissances sur les effets délétères qui peuvent résulter d'une exposition à un faible degré commençant à la naissance et durant toute la vie, d'autre part.

5 - Etant donné que la dose génétique de 10 rems/30 ans délivrée par toutes les sources artificielles est regardée par tous les généticiens comme le maximum absolu acceptable et que les doses gonadales pour l'ensemble de la population sont exprimées en tenant compte avant tout des effets génétiques (article 32 de l'I.C.R.P.) nous voyons que les normes pour l'ensemble de la population reposent sur une interprétation de la dose génétique pour une population : (Articles 62 et 63 de l'I.C.R.P., 1958).

- La dose génétique pour une population est la dose qui, si elle était reçue par chaque personne, depuis la conception jusqu'à l'âge moyen de la procréation aboutirait au même fardeau génétique pour l'ensemble de la population que les doses actuelles reçues par les individus.

- La dose génétique admissible est la dose qui, si elle était reçue par chaque personne depuis la conception jusqu'à l'âge moyen de la procréation aboutirait à un fardeau acceptable pour l'ensemble de la population.

- La dose génétique pour une population peut être définie comme étant la dose génétique annuelle significative que multiplie l'âge moyen de la procréation (30 ans). La dose génétique annuelle significative pour une population est la moyenne des doses gonadales annuelles individuelles.

Les concentrations maximum permises de radioéléments dans l'eau et l'air sont liées au problème de l'irradiation interne que nous aborderons dans le chapitre suivant.

TABLEAU I

NORMES GONADALES RECOMMANDEES (a) PAR L'ICRP (congrès de Munich 1959)

Groupes exposés	Exposition des gonades ou irradiation totale du corps	
	Doses (j)	Coëfficients
A - Travailleurs occupés	3 rem/trimestre (i) 12 rem/an ou 5 rem/an (i) (moy.)	I
B _a - Travailleurs dans le voisinage	1,5 rem/an (i)	3/10 (f) de 4 Oh DMA
B _b - Visiteurs occasionnels de l'installation	1,5 rem/an (i)	3/10 (f) de 4 OH DMA
B _c - Collectivités vivant dans le voisinage	0,5 rem/an (i)	1/10 (f) de 168 h DMA
C - Ensemble de la population (e)	0,5 rem/an (i) ou 5 rem (b) (moy.) jusqu'à 30 ans ou 0,17 rem/an (b) moy. 0,05 rem/an (g) moy.	1/100 (g) de 168 h CMA

- (a) Ces valeurs sont admises en supplément des doses d'exposition radiologiques et naturelles.
- (b) Ces valeurs doivent être multipliées par 0,3 pour obtenir la dose concernant l'irradiation interne.
- (c) Ces valeurs doivent être multipliées par 2, quand nous voulons les appliquer à la peau ou la thyroïde, 2/n (d) pour l'os et 5 pour les pieds, les mains, les chevilles et les avant-bras.
- (d) n = facteur relatif de dommage. Il est = 1 pour le radium et les radiations γ , 5 pour les radionuclides dans l'os.
- (e) Ces valeurs concernant l'ensemble de la population sont suggérées et non recommandées par l'ICRP. Le Comité Ad Hoc du NCRP suggère un taux moyen voisin du niveau naturel 0,1 rem/an, mais cette suggestion n'a pas été confirmée par le NCRP.
- (f) Ce facteur doit être réduit, il s'agit d'irradiation externe.
- (g) Ces valeurs sont seulement valables pour l'irradiation interne.
- (h) cf. (i) L'ICRP ne fixe pas les limites pour l'irradiation β du cristallin.
- (i) Applicables seulement pour les organes hématopoïétiques, le cristallin (h) et certains mélanges de radio-éléments.
- (j) Toutes les doses indiquées sont des maximum, sauf lorsqu'il est indiqué qu'il s'agit de doses moyennes.

TABLEAU II

REPARTITION SUIVANT LES SOURCES DE LA DOSE EBR MOYENNE - 30 ANS
SUGGEREE PAR L'ICRP POUR SERVIR DE GUIDE

(4,5 médicale) (1)	(2,0	(1,5 interne 0,5 externe
		— 2,0 générale pour l'ensemble de la population
5,0 autre		
(4,5 naturelle)	3,0	(1,0 professionnelle 0,5 pour les groupes spéciaux 1,5 réserve
<u>14</u> totale	(<u>5,0</u>	(<u>3,0</u>

(1) Les valeurs médicales et naturelles sont les valeurs moyennes probables en U.S.A. et ne sont pas des valeurs spécifiquement recommandées par l'ICRP.

- Il peut y avoir une permutation dans les valeurs suggérées, selon l'importance des doses médicales reçues.

TABLEAU III

NORMES PRESENTES RECOMMANDEES PAR L'ICRP POUR LES AUTRES ORGANES
CRITIQUES, POUR UNE LARGE COUCHE DE POPULATION (a)

	Valeurs maximum (e)			Valeurs moyennes (d)		
	rem/an	rem/30 a	rem/s	rem/a	rem/30 a	rem/sem
Thyroïde et peau	3	90	0,06	1	30	0,02
Os (c)	3/n	90/n	0,06/n	1/n	30/3	0,03/n
Gonade et corps total	0,5	15	0,01	0,17 (b)	5 (b)	0,003 (b)
Organes hématopoïétiques, cristallins	0,5	15	0,01	0,17	5	0,003
Autres organes	1,5	45	0,03	0,5	15	0,01

- (a) Les valeurs citées sont admises en supplément des doses d'exposition d'origine naturelle ou médicale.
- (b) Ces valeurs doivent être multipliées par 0,3 pour obtenir la dose concernant l'irradiation interne.
- (c) n = facteur relatif de dommage. Il est = 1 pour le Radium et les radiations γ , 5 pour les radionuclides dans l'os.
- (d) Ces valeurs concernant l'ensemble de la population sont suggérées et non recommandées par l'ICRP. Le comité Ad Hoc du NCRP suggère un taux moyen voisin du niveau naturel (0,1 rem/an) mais cette suggestion n'a pas été confirmée par le NCRP.
- (e) Ces valeurs maximum sont recommandées par l'ICRP.

TABLEAU IV

MODIFICATIONS SUCCESSIVES DEPUIS 1952 DES NORMES (a) POUR UNE
LARGE COUCHE DE POPULATION

Dose pour une irradiation totale (a)	Observations
0,03 rem/semaine	suggérée par le NCRP en Septembre 1952 comme DMA pour un organe quelconque.
0,05 rem/an (ou 0,01 rem/semaine)	recommandée par le NCRP en Avril 1958 et par l'ICRP en Juillet 1959 comme DMA pour les gonades } ou une irradiation totale du corps
5 rem/30 ans (ou 0,003 rem/semaine)	suggérée par l'ICRP en Septembre 1958 comme dose EBR moyenne pour les gonades (ou une irradiation totale du corps)
0,1 rem/an (ou 0,002 rem/semaine)	suggérée par le Comité Ad Hoc en Mai 1959 et admise par le NCRP pour une dose EBR moyenne à n'importe quel organe.

(a) Les valeurs données sont admises en supplément des doses d'exposition d'origine médicale et naturelle.

TABLEAU IV' COMPARATIF

MODIFICATIONS SUCCESSIVES DEPUIS 1934 DES NORMES DMA

POUR UNE PERSONNE PROFESSIONNELLEMENT EXPOSEE ET POUR UNE EXPOSITION

"IN TOTO"

Doses recommandées (a)	Observations
0,2 rem/jour (ou 1 rem/semaine)	recommandée par l'ICRP en 1934 et universellement admise jusqu'en 1950
0,1 rem/jour (ou 0,5 rem/semaine)	recommandée par le NCRP en Mars 1934 et admis aux USA jusqu'en 1949
0,3 rem/semaine	recommandée par le NCRP en Mars 1949 et admis jusqu'en 1956
5 rem/an (ou 0,1 rem/semaine)	recommandée par l'ICRP en Avril 1956 et le NCRP en Janvier 1957

(a) Les valeurs données sont admises en supplément des doses d'exposition d'origine médicale et naturelle.

LES PROBLEMES DE L'IRRADIATION INTERNE ET SA MESURE

— — —

LES NORMES DE TOLERANCE (CONCENTRATIONS MAXIMUM PERMISES)

Les taux des concentrations maximum permises des radio-éléments dans l'eau et l'air sont établis en tenant compte de deux impératifs :

I - Les C.M.P. sont établies en tenant compte des multiples facteurs dont dépend l'irradiation interne et que nous énumérerons succinctement :

a - La voie de pénétration d'un radio-élément peut être :

- cutanée (plaie),
- pulmonaire (inhalation),
- digestive (ingestion).

Selon la nature de la voie de pénétration, la destinée du radio-élément sera variable ; il pourra ainsi :

- soit être éliminé (nettoyage de la plaie, expiration ou expectoration, excrétion avec les fèces),

- soit se fixer : au niveau du tractus gastro-intestinal (directement ou par régurgitation)

: dans les poumons (par inspiration et sédimentation),

- soit passer dans la circulation sanguine (quelle que soit la voie de pénétration).

b - Les facteurs qui déterminent le lieu de fixation du radio-élément dépendent des propriétés physiques et des propriétés chimiques, lesquelles conditionneront le métabolisme, du radio-élément :

- Les propriétés physiques, c'est à dire les dimensions et la solubilité déterminent sa fixation, sa distribution dans la circulation sanguine, son élimination.

- Les propriétés chimiques du radio-élément l'amènent à suivre les mêmes voies métaboliques que les corps chimiques semblables à lui qui sont habituellement métabolisés par l'organisme : par exemple le Strontium, le Radium et le Baryum suivront un trajet à peu près identique à celui du Calcium.

c - Les effets biologiques de l'élément radio-actif dépendent :

1 - De sa période efficace : c'est le temps nécessaire pour que l'organisme se débarrasse de la moitié des substances radio-actives qu'il contient, par une combinaison :

- de l'excrétion, laquelle est fonction de la période biologique (B) (temps nécessaire pour que la moitié de la substance radio-active soit excrétée),

- de la décroissance radio-active, laquelle dépend de la période (P).

$$\text{Période efficace (E)} = \frac{B \times P}{B + P}$$

2 - De l'énergie de rayonnement et de l'efficacité biologique relative, donc de la quantité de radiation absorbée exprimée en rems.

$$1 \text{ Rad (100 ergs/g)} \times \text{E.B.R.} = 1 \text{ rem (roentgen equivalent man)}$$

Le coefficient d'efficacité biologique relative (E.B.R.) est le rapport qui existe entre l'efficacité biologique d'un rayonnement et celui de l'efficacité biologique d'un rayonnement X de 250 KeV dont l'E.B.R. prise pour référence est égale à 1. Cette efficacité biologique correspond à la production de 100 paires d'ions par micron de tissu traversé lorsque le transfert linéaire d'énergie produit, par l'absorption de 10 rads/mn., est de 3 KeV/micron.

L'efficacité biologique relative dépend donc de la densité linéaire d'ions formés sur le parcours de la particule ionisante ; et l'on sait que la densité d'ionisation varie le long du parcours comme le carré de la charge de la particule et avec la vitesse (selon une relation complexe).

Ce coefficient E.B.R. est donné dans le tableau suivant pour une irradiation externe ; nous verrons qu'il varie dans le cas d'irradiation interne selon que l'exposition est aiguë ou chronique.

- E.B.R. (X , électrons et positons) = 1
- E.B.R. (γ) = 1 ou 1,7
- E.B.R. (α) = 15 à 20 ; parfois 10
- E.B.R. ($\beta \pm$) = 1 à 1,7
- E.B.R. (électrons de recul) = 20
- E.B.R. (neutrons thermiques) = 2 à 3
- E.B.R. (neutrons) = 5 à 10.

3 - De sa répartition $\pm$ uniforme dans l'organisme (effets localisés ou généralisés).

4 - De l'organe critique. Cet organe critique sera choisi selon divers critères, ce sera :

- tantôt celui dans lequel la concentration du radio-élément est la plus grande,
- tantôt celui qui présentera les plus grandes lésions histologiques,
- tantôt celui qui sera le plus radio-sensible,
- tantôt celui qui fixe le plus longtemps le radio-élément.

Il sera variable également selon le mode de pénétration, le mode et la vitesse de répartition du radio-élément.

5 - De l'association d'agents contaminants : la toxicité totale est supérieure à la toxicité particulière de chaque élément pris séparément.

II - Les C.M.P. sont calculées de façon à ce que la dose délivrée au niveau de l'organe critique ne dépasse pas 0,3 rem/semaine (168 heures) pour une personne professionnellement exposée. L'organe critique considéré est l'un des quatre suivants : Gonades, Moëlle osseuse, Cristallin, Peau.

- On a calculé pour tous les radio-éléments, en fonction des données métaboliques et radiobiologiques, la quantité d'éléments susceptibles de délivrer cette dose au niveau de l'organe critique : c'est ce qu'on appelle la quantité maximum admissible dans l'organisme pour l'élément considéré. Cette quantité s'exprime en curies.

- Sauf pour le système osseux : dans ce cas les quantités maximum admissibles sont calculées de façon à ce que la dose délivrée au niveau de la moëlle osseuse soit inférieure ou égale à l'équivalent de 0,1 μ c de Radium.

- Ces normes de tolérance ont permis de définir des normes de sécurité valables pour le milieu ambiant. Elles s'expriment en μ c/cm³ et sont directement mesurables.

- Pour déterminer la C.M.P. dans l'air, dans le cas d'une irradiation de l'organe critique pour une exposition longue et continue, on utilise la formule suivante :

$$X = 0,294 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{m}{T \cdot f \cdot E \cdot EBR \cdot N} \cdot \frac{I}{I - e^{-\lambda t}}$$

dans laquelle : m = masse critique de l'organe critique.

T = période efficace.

f = fraction de l'activité totale inhalée retenue dans l'organe critique.

E = énergie moyenne en MeV de la R.I. émise

N = coefficient de répartition non uniforme.

λ = constante radio-active effective ($\lambda_e = \lambda_p + \lambda_b$)

Les indications que nous donnons s'appliquent aux personnes professionnellement exposées. Il existe pour celles-ci deux sortes de normes selon qu'il s'agit d'une exposition permanente ou d'une exposition exceptionnelle. Pour la population les normes précédentes doivent être divisées par 10 ou 100 selon que la population exposée représente le 1/10 ou plus de la population du pays et selon qu'elle est ou non dans une zone contrôlée.

En pratique, nous retiendrons les données suivantes :

D'après leur toxicité, les radio-éléments se classent en trois catégories :

1 - Les radio-éléments peu dangereux :

H_3 , C_{14} , S_{35} , Cs_{137} , Au_{198} , Na_{24} , S_{35} .

C.M.P. dans l'AIR : $\leq 10^{-7} \mu c/cm^3$

C.M.P. dans l'EAU : $\leq 10^{-3} \mu c/cm^3$

2 - Les radio-éléments moyennement dangereux :

A_{41} , Ca_{45} , Fe_{59} , I_{131} , Ba_{140} , U_{238} .

C.M.P. dans l'AIR : comprise entre 10^{-7} et $10^{-10} \mu c/cm^3$

C.M.P. dans l'EAU : comprise entre 10^{-3} et $10^{-5} \mu c/cm^3$

3 - Les radio-éléments très dangereux :

Sr_{90} , Ra_{226} , Pu_{239} .

C.M.P. dans l'AIR : $< 10^{-10} \mu c/cm^3$

C.M.P. dans l'EAU : $< 10^{-5} \mu c/cm^3$

En ce qui concerne le Strontium 90, la quantité maximum admissible ne doit pas dépasser pour l'ensemble de la population 100 Sunshine Units (c'est à dire 100 μ micro-curies par gramme de calcium dans l'organisme). Ces valeurs doivent être considérées comme provisoires et susceptibles d'être modifiées dans l'avenir. Toutes les C.M.P. ne sont pas connues : celles du Radon par exemple.

LES PRINCIPES DE LA DOSIMETRIE INTERNE - POSSIBILITES

--

Théoriquement, on peut déterminer par des mesures instrumentales et par le calcul la dose absorbée par l'organisme et dissipée par les radio-éléments qu'il contient. En pratique, il est impossible d'obtenir des renseignements clairs sur la dose absorbée ou la dose délivrée.

Le principe de la mesure des doses absorbées consiste à mesurer à l'aide de compteurs le rayonnement γ global, émis par les radio-éléments contenus dans l'organisme. On peut, après étalonnage des instruments sur des fantômes contenant une certaine variété de radio-éléments estimer, par comparaison les quantités et même la distribution des radio-éléments absorbés.

Connaissant ces données, on parvient par le calcul à estimer les doses absorbées par les différents organes critiques.

En fait, il ne s'agit là que d'approximations grossières des doses absorbées par sections de corps ou par organe.

IMPLANTATIONS D'INSTRUMENTS DE MESURE :

Il est possible dans quelques cas de pratiquer des mesures plus précises en pratiquant l'implantation de petits instruments dans certaines cavités du corps. Ces techniques sont assez peu connues et utilisées, mais Morgan qui les a proposées, pense qu'elles devraient être plus couramment employées.

On utilise pour cela de petites baguettes d'argent au phosphate d'argent activé et des semi-conducteurs (les semi-conducteurs sont des corps qui ont une structure non uniforme et composée de couches de conductibilité variable (du fait que ces couches ont un arrangement moléculaire variant

de la structure cristalline à la structure métal-conducteur). Les semi-conducteurs peuvent être excités par une radiation ionisante : ce sera le résultat de cette excitation qui sera enregistré.

On utilise les baguettes de verre au phosphate d'argent activé pour les mesures des rayons α , γ , et β , et pour le dosage des neutrons. Les semi-conducteurs peuvent être employés pour la mesure des doses de neutrons et le rayonnement α . On doit tenir compte en les utilisant de la distribution de l'énergie de la R.I., en particulier de l'absorption des filtres protecteurs et des matières fécales.

a - Cas du Tractus gastro-intestinal et de l'Arbre Pulmonaire

Les expériences de Hayes, Nold, Comar et Kakehi (1) ont porté sur des chiens et des chèvres. Les dosimètres au phosphate d'argent étaient implantés chirurgicalement dans la paroi digestive et retirés après que les animaux aient guéri de leur intervention. Ces animaux avaient absorbé du Strontium 90 et 89 (émetteurs β).

Dans le cas de l'homme, il serait possible de faire avaler au sujet un certain nombre de dosimètres et ceux-ci pourraient être recueillis après vomissement ou défécation.

b - Cas de la Vessie, du Pharynx, des Testicules et des Ovaires

Les dosimètres peuvent être appliqués au voisinage immédiat de ces organes.

Les doses absorbées au niveau des testicules ou des ovaires présentent un grand intérêt, puisqu'il s'agit de C.M.P. qui sont en relation directe avec les normes génétiques.

W.S. Snyder (2) a calculé la dose absorbée par le cortex ovarien d'une femme qui avait bu de l'eau contaminée par des produits de fission. Il assure que dans ce cas la dose totale absorbée était distribuée en trois points :

(1) R.L. Hayes, M.M. Nold, C.L. Comar et Kakehi : "International Radiation Dose Measurements in Live Experimental Animals" (Health Physics 1960-I-II)
(2) W.S. Snyder : "An Estimate of Dose to the gonads from Radioactive Elements Present in Food or Water" (9ème Congrès de Radiologie, Munich 24-30 Juillet 1959).

- 1 - Les ovaires eux-mêmes
- 2 - Le tube digestif
- 3 - La vessie.

La vérification de ces résultats n'a pas encore été faite.

EQUATIONS DEFINISSANT LES CONCENTRATIONS MAXIMUM PERMISES AU NIVEAU DE CERTAINS ORGANES CRITIQUES :

Dans ces calculs, l'ICRP a fait un certain nombre de suppositions assez approximatives quant à la distribution, la rétention et l'élimination des radio-éléments.

Elle considère comme organe critique, l'organe qui présente la plus grande concentration de radio-éléments à un moment déterminé : l'organe critique peut donc changer dans l'espace de temps qui suit le début de l'exposition. Par exemple ce peut être initialement le tube digestif, puis le poulmon, enfin l'anus.

1 - Equation générale pour calculer la C.M.P.

La quantité Q de radio-élément présente dans l'organe critique à un temps t est une somme d'exponentiels :

$$Q = \sum A e^{-\lambda t} \quad (I)$$

En pratique, seul le premier élément est important, car la somme des faits biologiques détectée est limitée et imprécise.

Le coefficient d'élimination effective est $\lambda = \lambda_r + \lambda_b$ et la période efficace est :

$$T = \frac{T_r T_b}{T_r + T_b}$$

T = Période efficace,
 T_r = Période radioactive,
 T_b = Période biologique.

La quantité de radio-élément retenue est donnée par l'équation :

$$P = \frac{dQ}{dt} + \lambda Q \quad (2)$$

Lorsque $Q = \frac{1}{2}$, $\lambda = \frac{0,693}{T}$ (3). En effet $\frac{1}{2} = e^{-\lambda T}$

$$L2 = \lambda T \text{ et } \lambda = \frac{L2}{T} \quad (4).$$

Lorsqu'on résoud l'équation (2), on obtient l'équation communément utilisée pour calculer la C.M.P. :

$$\boxed{\text{C.M.P.} = \frac{CQ}{T \cdot f \cdot (1 - e^{-0,693 \frac{t}{T}})}} \quad (5)$$

dans laquelle :

$C = 10^{-7}$ pour l'inhalation,

$C = 10^{-4} \times 9,2$ pour l'ingestion d'eau ou d'aliments et quand la C.M.P. se rapporte à une exposition de 40 h/sem.,

t = le temps,

T = la période efficace (en jours),

f = la fraction de radio-élément qui, après avoir été retenue dans le corps, arrive dans l'organe critique.

La dose en μc dans l'organe critique (Q) ou la dose totale du corps (q) sont données par les équations suivantes :

$$q = \frac{Q}{f_2} = \frac{5,4 \times 10^{-5} \text{ mR}}{f_2 \epsilon} \quad (6) : \text{dans tous les cas, sauf}$$

$$q = \frac{Q}{f_2} = \frac{II}{f_2 \epsilon} \quad (7) : \text{dans le cas de l'Os}$$

dans lesquelles : q = quantité de μc dans tout le corps,

f_2 = fraction de radio-élément contenu dans l'organe critique de masse m ,

m = masse de l'organe critique,

ϵ = l'énergie dissipée dans l'organe critique par désintégration du radio-élément,

R' = dose fixée en rems/an.

L'équation (6) donne la dose totale du corps, pour une dose fixée R' . Elle est appliquée dans tous les calculs de la Concentration maximum permise pour le corps, sauf dans le cas où l'organe critique est l'os et que les radiations α , β , sont émises par les radio-éléments qui s'y sont fixées. Dans ce cas on applique l'équation (7).

L'équation (7) donne la concentration permise pour le corps, si l'on considère que celui-ci est irradié par la concentration maximum permise de radium 226 (0,1 μ c). La constante dans cette équation est :

$$0,1 \times 0,99 \times 110 = II,$$

dans laquelle : 110 est la quantité d'énergie délivrée par le Ra 226 et ses dérivés. On l'obtient elle-même à partir de l'équation :

$$\Sigma = \sum E. EBR. n \quad (8)$$

Dans ce cas $EBR(\alpha) = 10$

n = facteur relatif de danger = 1

$$\text{Donc } \Sigma \text{ Ra 226} = 11 \times 10 \times 1 = 110$$

Donc le facteur Σ (équations (6) et (7) représentant l'énergie efficace transférée dans l'organe critique par la désintégration du radio-élément peut être obtenu à partir de l'équation (8) dans laquelle on remplace la valeur EBR par sa valeur, variable avec le rayonnement produit.

Expérimentalement, on a trouvé que $EBR(\alpha) = 10$ pour les différents types d'exposition chronique et que $EBR(\alpha) = 1$ pour les expositions aiguës.

$n = 1$ pour les tissus mous (Σ de l'équation (6)) et $n = 5$ pour les os (Σ de l'équation (7)), sauf si le radium est le radio-élément retenu ou qu'il y ait seulement émission de rayons γ : dans ce cas :

$$n = 1$$

2 - Variations des concentrations maximum permises, selon le temps d'exposition :

a - Dans les cas d'exposition prolongée

- le temps t de l'équation (5) est fixé à 50 ans

- la dose R' de rétention de l'équation (6) a pour valeur la "dose moyenne EBR permise par an pour une personne professionnellement exposée" (valeurs données par l'ICRP en fonction des différents organes critiques).

b - Dans le cas d'exposition aiguë

- la dose (concentration) maximum permise pour une exposition d'une personne professionnellement exposée est donnée par le rapport de Munich de l'ICRP (I).

- Les quantités de radio-éléments admises dans ces cas ne doivent pas dépasser la quantité de radio-éléments qui donnerait la même dose d'irradiation que l'accumulation pendant treize semaines de la concentration maximum admise pour une exposition de personne professionnellement occupée.

- S'il s'agit d'exposition simple répétée, la dose EBR résultante au cours des 50 années ne doit pas excéder le $1/4$ des limites fixées pour la concentration maximum admise par an pour une personne professionnellement occupée.

c - Dans le cas d'une exposition exceptionnelle

La dose résultante EBR ne doit pas dépasser la dose qui résulterait de l'admission pendant un an de la concentration maximum admise pour une personne professionnellement occupée.

(I) ICRP Publication : "Report on decisions at the 1959 Meeting of the International Commission on Radiological Protection" (Amer. J. of Roent. vol. 83, N° 2, p. 372 - 75 ; et "Health Physics", vol. 2, N° 3 p. 317. Tous deux de Février 1960).

3 - Méthodes d'évaluation de la dose absorbée lorsque les doses irradiées sont fournies par les radio-éléments internes :

Il existe plusieurs méthodes à l'aide desquelles on peut calculer la dose absorbée, irradiée par des radio-éléments internes et déterminer si oui ou non la limite maximum permise de dose EBR a été dépassée. On s'adresse habituellement à des méthodes de calcul.

L'équation (6) est communément utilisée pour calculer la dose moyenne absorbée par une masse de tissu m. Nous rappelons cette équation :

$$q = \frac{Q}{f_2} = \frac{5,4 \times 10^{-5} \text{ mR}}{f_2 \epsilon} \quad (6)$$

a - Dans le cas de la masse de tissu m, elle s'écrit :

$$R = \frac{360 q f_2 \epsilon}{m} \quad \text{rem/semaine} \quad (9)$$

dans laquelle : $q f_2 = I_0 f =$ la dose d'organe, exprimée en μc .

I_0 = représente dans ce cas les microcuries retenues dans le corps.

f_2 = est la fraction qui parvient à l'organe de masse m.

b - La dose EBR retenue en un point du corps est parfois désirable en termes de flux ; dans le cas d'un rayonnement α ou β , la dose EBR est donnée par l'équation :

$$R = \frac{9,7 \times 10^{-9} \times \Phi \text{ SW (EBR)}}{\rho} \quad \text{rem/sem.} \quad (10)$$

dans laquelle :

Φ = Flux de rayonnements α ou β : rayonnement/cm²/sec.

S = Ionisation spécifique (nbre de paires d'ions/cm).

ρ = Densité du tissu en g/cm³

S et W ne sont pas connues pour les tissus : on les déduit de celles de l'eau.

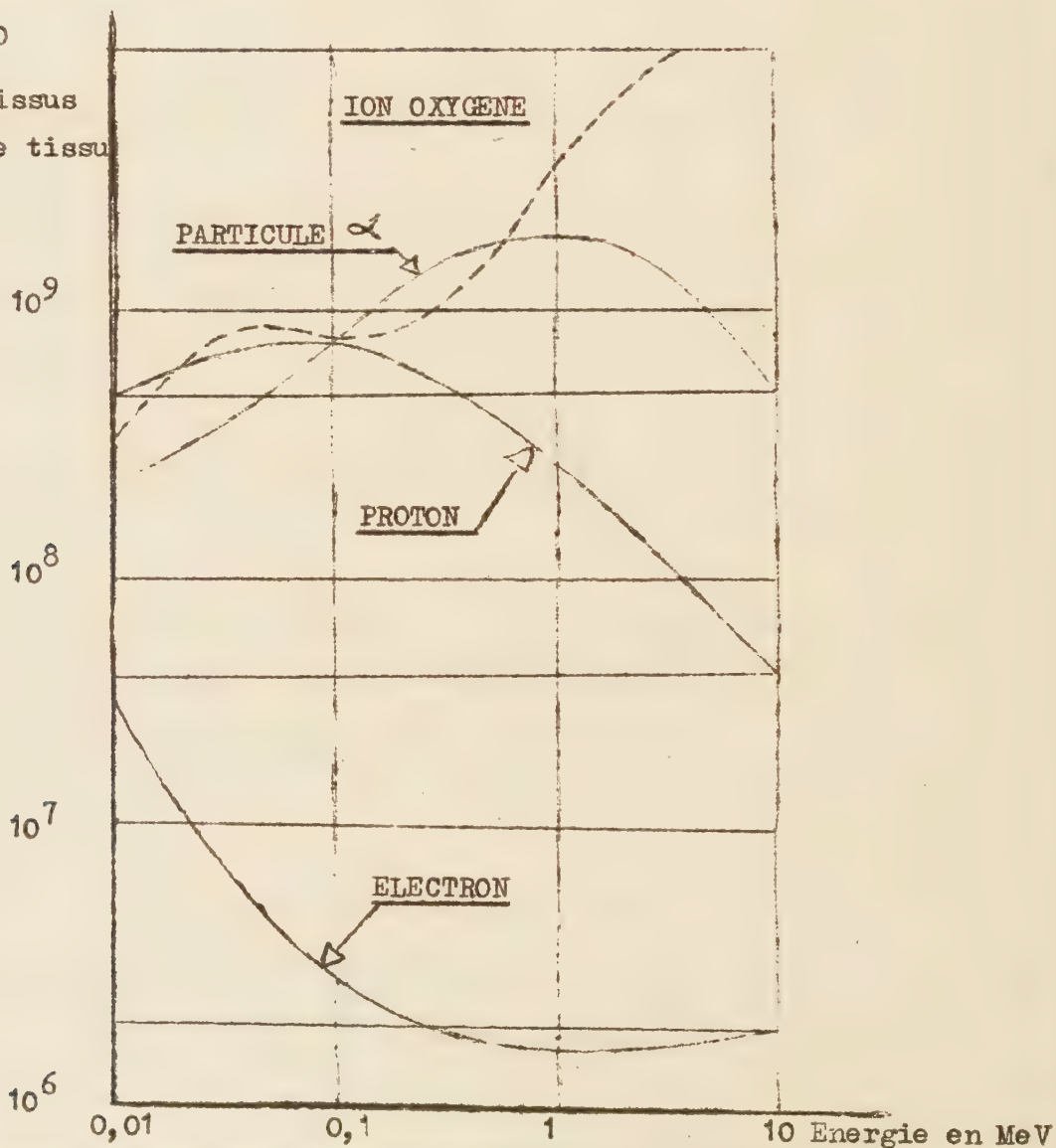
PUISSANCE D'ARRET DES TISSUS :

Le produit $\frac{SW}{\rho}$ est la puissance d'arrêt des tissus, exprimée en $\frac{\text{eV/cm}^2}{\text{g}}$ et est obtenue en appliquant le principe de Bragg-Gray.

$$P = \frac{SW}{\rho} = \frac{S_a W_a P_t}{\rho_a}$$

La figure suivante est tirée des travaux de Snyder, Neufeld, Bothe et Sternheimer (I) (Cf. page suivante). Elle montre la puissance d'arrêt des tissus en fonction de l'énergie.

Puissance 10^{10}
d'arrêt des tissus
en $\text{eV/cm}^2/\text{g}$ de tissu



PUISSANCE D'ARRET DES TISSUS EN FONCTION DE L'ENERGIE

LE PROBLEME DE LA BLESSURE CONTAMINEE PAR LES PARTICULES RADIOACTIVES :

Un des problèmes les plus difficiles de la dosimétrie interne est de pouvoir évaluer la dose EBR admissible pour une blessure contaminée par le voisinage de particules radioactives. Ce problème a été étudié par Snyder et Ford en 1956 qui ont établi que : (2)

"Les dangers qui menacent une blessure contaminée par une particule radioactive insoluble peuvent être bien plus grands, dans bien des cas, que les dangers dûs aux inhalations ou ingestions de corps radioactifs".

Les problèmes que posent les contaminations par particules radioactives dans les poumons ou les ganglions lymphatiques sont tout à fait comparables à ceux que posent les blessures contaminées.

Si l'atténuation de la particule elle-même est négligeable, la dose à une distance r (cm) délivrée dans le tissu par la particule est donnée par l'équation :

$$R = \frac{2,9 \times 10^{-5} \times B \cdot SW \times e^{-\mu_t r}}{\rho r^2} \text{ rem/sem. (11)}$$

dans laquelle : $B = \mu c$ par particule

$\mu_t =$ coefficient d'atténuation de la radiation dans le tissu.

La dose moyenne EBR dans une sphère de rayon r , relative à la pénétration de la particule dans le tissu est donnée par l'équation :

$$R = \frac{8,6 \times 10^{-5} \times B \cdot SW \times EBR (1 - e^{-\mu_t r})}{\rho r^3 \mu_t} \text{ rem/sem. (12)}$$

Dans toutes ces relations SW/ρ se calcule d'après la courbe de la puissance d'arrêt des tissus.

(1) Radiation research p. 67-68, Janv 1957 ; Annual Review of Nuclear science, vol 3, p. 259.

(2) Nations Unies - Vol. 13 p. 139 - 1956.

LA PROTECTION CONTRE LES RADIATIONS IONISANTES AU MOMENT
DE LA CREATION ET PENDANT LE FONCTIONNEMENT
DES INSTALLATIONS NUCLEAIRES

--

Cet aspect de la protection revêt un intérêt majeur :

- d'une part parce qu'il assure la sécurité de l'ensemble des travailleurs de l'Industrie nucléaire,
- d'autre part parce qu'il contribue d'une manière essentielle à la protection des collectivités tant locales qu'éloignées, soit en restreignant les causes de dispersion des radio-éléments, soit en effectuant le contrôle de la pollution radioactive au voisinage des sites et des autres centres d'activité rattachés à ceux-ci.

LES MESURES DE PREVENTION PRISES AU MOMENT DE LA CREATION

Trois ordres de mesures préventives sont mises en application à ce stade :

1 - Des études préparatoires contrôlent le choix du site :

Ces études procèdent à une étude extrêmement approfondie du site envisagé. Plusieurs années avant que la construction des ouvrages industriels ne soit entreprise, une expertise géologique, écologique, minéralogique, explore les propriétés d'une très large zone territoriale dépendant du site choisi, en vue de prévoir les risques de transpiration radioactive des sols et de tirer profit des facteurs les moins favorables aux retombées

atmosphériques et des facteurs les plus favorables à la dispersion aquatique. L'exploration de la radio-activité du milieu est très longtemps poursuivie de manière à conserver pour l'avenir des points de comparaison.

Nous rapporterons l'exemple du centre de Savannah River (Centre plutonigène) qui est très caractéristique.

- Deux ans avant le début des travaux, on procéda à une étude systématique de la radio-activité naturelle de la région de la Caroline du Sud baignée par la Rivière Savannah. L'eau de la rivière, des affluents, des étangs et des systèmes de distribution d'eau pour la population fut analysée. Dans son ensemble, la région présentait une radio-activité naturelle peu élevée, représentée surtout par du Potassium 40. La radio-activité de la faune aquatique était insignifiante.

- Dans le domaine de la micro-météorologie, les investigations montraient que les conditions étaient bonnes et qu'il n'était pas nécessaire de prévoir un service de météorologie (indispensable dans d'autres centres).

- L'Académie des Sciences naturelles de Philadelphie était engagée pour déterminer l'abondance et l'état de santé de la flore et de la faune de la Rivière Savannah. L'Université de Géorgie dressait une carte des migrations des poissons-chats de la S-R ainsi que celle de leur localisation la plus fréquente.

- Le Département des études géologiques du Ministère de l'Intérieur fit une étude de l'affaissement des fonds aquatiques consécutifs aux opérations de pompage des terrains voisins : cette analyse avait pour but de prévoir le taux et la direction de l'infiltration, ainsi que les possibilités de migration des radio-éléments dans le sol.

Toutes ces études ont été renouvelées après la mise en marche des piles.

2 - Des dispositions architecturales ou technologiques minimisent ou rendent pratiquement impossibles les risques d'accidents :

Parmi ces accidents, citons :

- L'accident de mise en marche (" start up accident ") : du fait de l'existence d'un coefficient thermique négatif et pour compenser l'effet du

Xénon (poison puissant de la réaction en chaîne), il faut prévoir un excédent de réactivité au moment de la mise en marche du réacteur. Il est alors possible que cette réactivité supplémentaire lance le réacteur trop rapidement et multiplie plusieurs fois son potentiel habituel, avant qu'on ait eu le temps d'en faire la mesure. Le résultat de cet accident pourrait être la fusion et l'évaporation des éléments combustibles.

- La divergence ou l'emballlement du réacteur (" nuclear runaway ") : la modification de l'espacement des barres de combustible peut renverser le signe (- en +) de la réactivité du vide formé entre elles et multiplier brutalement la puissance du réacteur jusqu'à ce que le combustible fonde et s'évapore. Par ce mécanisme, les produits de fission peuvent être libérés et répandus aux alentours, malgré l'existence de barrières de protection.

- L'accident de la fonte ("melt-down accident") : la réaction nucléaire terminée, la génération de chaleur par le coeur du réacteur ne s'arrête pas (une seconde après l'arrêt de la réaction le niveau de puissance est encore = 7/100 de la puissance normale). Si le refroidissement de la réaction est perturbé (arrêt des pompes, rupture de canalisation dans le circuit refroidissant) la fonte du coeur peut se produire, même après arrêt de la réaction et être suivie de la dispersion des produits de fission. Ces sortes d'accidents sont moins à craindre dans les réacteurs à neutrons rapides, car les accidents du refroidissement (on utilise dans ce cas le mercure ou le sodium liquide) sont eux-mêmes inexistants du fait de la faible pression du refroidisseur dans les circuits de refroidissement.

En vue d'éviter ces accidents, c'est à dire d'assurer la stabilité nucléaire des réacteurs et éventuellement la capture des produits de déchets, toutes sortes de précautions sont prises au moment même de la construction des centres nucléaires.

- On affecte le réacteur d'un coefficient thermique négatif : pour que la puissance du réacteur ne dépasse pas un niveau déterminé, on s'arrange pour que tout accroissement (ou que toute cause d'accroissement) du potentiel et de la température du coeur soient suivis d'une réduction automatique de la radio-activité.

- Le refroidisseur est décontaminé à l'arrivée pour ne pas être activé par les neutrons qui le traverseront. Si l'on utilise l'eau, on évite soigneusement tout contact de celle-ci avec l'Uranium : à certaines températures une explosion chimique pourrait se produire.

- Tous les réacteurs sont soigneusement enfermés dans des enveloppes à parois multiples constituées de béton, de Bore, de Cadmium, de Plomb, de Masonite (fibres de bois comprimées) ; certains sont souterrains (réacteur homogène de Los Alamos). Les réacteurs modernes sont pourvus de coquilles de vapeur ("Vapor shells") capables d'absorber dans presque toutes les conditions, les produits de fission qui pourraient être libérés accidentellement.

- Enfin de multiples systèmes de tests (" SPERT "), de contrôle et d'alarme complètent cet ensemble de mesures et assurent en permanence la sécurité des différents types de réacteurs. Pratiquement tous ces systèmes sont prévus pour que la réaction en chaîne soit instantanément (en une fraction de seconde) stoppée, dès que survient une des perturbations suivantes :

- hausse de température,
- activité excessive des neutrons,
- croissance trop rapide de cette activité,
- mauvais fonctionnement du système refroidisseur,
- dissipation de produits de fission dans le refroidisseur ou les enveloppes du réacteur (rupture des gaines qui renferment les barres de combustible, par exemple),
- tremblement de terre.

3 - L'adaptation des plans au type et à la puissance du réacteur, aux conditions géophysiques et météorologiques, aux périodes et aux quantités de produits de fission produits :

- Dans le cas des réacteurs homogènes, le combustible est liquide et de même nature que le modérateur de neutrons. Les effluents gazeux sont libérés directement par le combustible (il n'y a pas de gaines). Il faut donc procéder à leur rétention prolongée (et fonction des périodes respectives) avant de les libérer dans l'atmosphère.

- On pratique de la même manière pour l'Iode 131 (de période = 8-9 J) dans les réacteurs courants : c'est le rejet différé.

- La hauteur des cheminées d'évacuation est évaluée de telle manière que la diffusion des gaz minimisent les retombées (Loi de Stokes). On procède à des tests préalables dans des tours météorologiques à l'aide du gaz fréon (utilisé dans les réfrigérateurs) inoffensif : on parvient dans ces tests à déceler une molécule de gaz (Laboratoire d'Argone).

- Dans les réacteurs à neutrons rapides ou les Breeders ("Couveuses" parce que la diminution de la masse critique due à la fission est compensée par une production équivalente ou supérieure de matière fissible) il faut par exemple absolument éviter que la réaction en chaîne ne soit entretenue que par les neutrons rapides. Le temps que met un neutron né de la fission pour être recapturé par la matière fissible et produire une nouvelle fission est beaucoup plus court que dans les réacteurs à neutrons thermiques (dans un Breeder les neutrons sont moins captables du fait de leur vitesse, mais la masse critique est beaucoup plus importante : l'enrichissement du combustible et son volume sont très élevés). Donc l'activité du réacteur est plus grande. Dans toute réaction en chaîne quelques neutrons nés de la fission sont retenus plus longtemps (80 secondes environ) et réagissent à retardement : ce sont les neutrons retardés (1 % des neutrons utilisés par la fission). Ils "ralentissent" spontanément la réaction en chaîne. Si pour une cause quelconque l'accroissement de l'activité dépasse le pourcentage d'activité due aux neutrons retardés, ceux-ci sont en quelque sorte court-circuités : la réaction est alors entretenue par les seuls neutrons rapides et, dans le cas des réacteurs à neutrons rapides, peut accroître la puissance du réacteur dans d'énormes proportions.

- On peut se faire une idée des mises au point nécessaires dans chaque cas particulier, pour assurer la sécurité des installations en examinant la liste des questions qui se posent au moment de concevoir une pile :

- Dans quelles conditions un type donné de réacteur peut-il se détériorer ?

- Par quelles caractéristiques peut-on limiter ces risques ?

- Lesquelles tendent à l'accroître ?

- Dans quelles conditions les combustibles fondent-ils ?
- Comment les combustibles fondus vont réagir avec les refroidis-
seurs ?
- Quelles seront la nature et la quantité de la radio-activité libérée ?
- L'enveloppe du réacteur pourra-t-elle résister à l'énergie libérée ?
- Quelle structure répondrait le mieux à cette nécessité ?
- Peut-on prévoir des "fusibles" toujours efficaces ?

LES MESURES DE PREVENTION PRISES PENDANT LE FONCTIONNEMENT

A - Il en est qui font suite à celles prises pendant la fondation des installations nucléaires et font corps avec elles :

Il en est ainsi :

- du maintien de la stabilité nucléaire du réacteur pendant son fonctionnement.

- des mesures prises pour éviter une augmentation de la clearance radio-active du réacteur : filtrage du refroidisseur à la sortie, soit à travers la cheminée d'évacuation (air), soit en laissant mourir les radio-éléments sur des bassins d'épandage (lits de sable) ou sur des parcours très sinueux (eau). Dans ce dernier cas on recherche une dilution maximum ; dans le premier on s'efforce de combiner rejet différé - filtration - retombées minimum.

B - Il en est qui commencent avec le fonctionnement du réacteur :

Ce sont celles qui ont trait :

- à l'aménagement des déchets,
- à la surveillance de l'environnement,

- à la surveillance du personnel. Nous ne nous attarderons pas sur les mesures prophylactiques prises dans le cadre de cette surveillance qui sont du ressort de la Médecine du travail et n'ont que peu de rapport avec la protection des populations. Eventuellement elle peut avoir à faire face à des accidents isolés mettant en jeu la vie de ces travailleurs irradiés : il s'agit alors de prendre des mesures immédiates qui sont d'ordre thérapeutique ou hospitalier.

LE PROBLEME DE L'AMENAGEMENT DES DECHETS RADIOACTIFS

—

a - Il est quatre facteurs dont il faut tenir compte lorsqu'on aborde ce problème :

- Les R.I. ne sont pas décelables à l'aide des sens, sauf à de très fortes concentrations (effet Cherenkov) (I).

- Seul le temps peut diminuer la radio-activité des déchets (importance de la période).

- Les effets toxiques sont souvent cumulatifs.

- Les dommages causés par les R.I. peuvent passer inaperçus assez longtemps.

b - Ce qu'on appelle déchets de l'énergie nucléaire comprend une grande quantité de substances :

- Les effluents des réacteurs et les résidus des activités annexes.

- Les eaux de lessive qui ont servi au lavage des tenues de travail, les serviettes contaminées, les débris de verre, les détritus des expériences de laboratoires ou des chaînes industrielles, les cadavres d'animaux qui ont servi aux expériences, les vieux réacteurs et machines démantelées de toutes sortes.

Les substances devenues radioactives peuvent ou bien provenir de la fission ou bien avoir été contaminées après avoir été exposées aux flux de neutrons des réacteurs. D'autres sont extériorisées au cours d'opérations diverses (préparation du combustible).

(I) Effet Cherenkov : L'eau et d'autres substances transparentes, comme le verre ou le mica, émettent une lueur bleue lorsqu'elles sont exposées aux rayons γ . La lueur apparaît quand des particules chargées électriquement

Les rayonnements que produisent ces substances sont de trois sortes :
alpha, bêta, gamma.

c - On classe les effluents :

- selon leur état physique : solide, liquide, gazeux,
- selon leur concentration en radio-éléments : déchets à haut potentiel ou à bas potentiel radioactif.
- selon la période de ces radio-éléments.

d - Le problème des déchets radioactifs demande qu'on envisage :

1 - L'origine de ces déchets.

2 - Leur aménagement.

3 - La pollution causée par ces déchets dans le milieu naturel et les aliments consommés par l'homme, ainsi que leur cycle. Cet aspect de la question sera étudié avec la surveillance de l'environnement.

-:-

I - ORIGINE DES DECHETS RADIOACTIFS

a - Les déchets produits par les centre nucléaires et leurs activités annexes :

1 - L'extraction du minerai : produit une dissipation de Radon, dérivé du Radium contenu dans la Pechblende. Localement les concentrations nuisibles sont évitées par ventilation. L'air provenant des mines ne provoque pas de contamination atmosphérique générale. Rappelons cependant les "cancers bronchiques" qui auraient été observés chez les travailleurs de Schneeberg et de Joachimsthal (situées le long de la frontière entre la Saxe et la Bohême) au temps où ces mines qui sont également uranifères étaient exploitées pour le Cu, le Co, l'Ag, etc

traversent un milieu à une vitesse supérieure à celle de la lumière dans ce même milieu. Cette lueur est plus fréquemment perçue dans les pièces d'eau des réacteurs de recherche, où les éléments combustibles sont visibles à travers l'eau protectrice.

En fait, aucune étude en rapport avec ces faits, n'a été entreprise depuis 1930 et surtout toutes les tentatives pour provoquer chez l'animal, un cancer bronchique à l'aide des substances de l'air de ces mines, sont demeurées sans résultat. (M. Eisenbud)

Lorsque les puits nécessitent un pompage de l'eau qu'ils contiennent (comme dans la région du Lac Ambrosia, dans le Nouveau Mexique) l'évacuation de cette eau peut se faire sans danger dans le milieu désertique, son degré de contamination étant extrêmement bas.

2 - Le Broyage du Minerai : Il existe aux Etats Unis 23 centres de broyage de minerai, qui traitent 22.000 tonnes de minerai par jour contenant moins de 100 curies d'activité. Ces centres concentrent l'Oxyde d'Uranium, et, de cet Oxyde on tire 50 tonnes de concentrés.

Ce broyage du minerai produit :

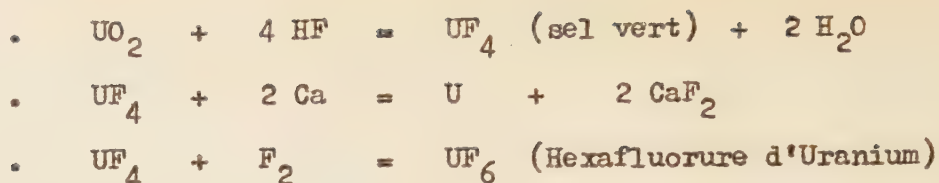
- des poussières radioactives,
- du Radon,

- et contamine environ 82.000 m³ d'eau ; la 1/150 partie de cette eau est fixée par les déchets solides. Cette eau contient un taux assez élevé de Radium, mais selon de récentes expertises la plus grande partie de ce radium serait accumulée dans l'eau fixée aux déchets solides. En 1959, on dut prendre des mesures dans II de ces centres de broyage car la contamination de l'eau et de l'air était trop élevée. L'eau polluée, après passage dans de grands étangs de rétention, est déversée dans des cours d'eau ou on la laisse s'infiltrer dans le sol.

3 - La préparation chimique des matériaux utilisés par les centres nucléaires :

A l'étape précédente on a obtenu les concentrés d'Oxyde d'Uranium (U_3O_8 = Oxyde noir ; UO_2 = Oxyde brun) par le procédé dit au Carbonate CO_3Na_2 , ou le procédé dit à l'Acide Chlorhydrique.

A cette étape-ci on procède au raffinage de ces concentrés en vue d'alimenter les réacteurs ou les appareils de diffusion gazeuse.



- U ou UO_2 peuvent être utilisés pour les réacteurs.
- L'Hexafluorure pour les cascades de diffusion.
- De l'Uranium est également fourni par le complexe des matériaux extraits du réacteur (Uranium recyclé).

Les déchets de cet ensemble d'opérations consistent en :

- Radon (raffinage et cascades) : les gaz sont épurés et le radon est ventilé. Ne pose pas de graves problèmes.
- Déchets liquides semblables à ceux que l'on avait dans les broyeurs contenant du Radium. L'ensemble des déchets produits par les opérations de raffinage (50 tonnes de concentrés traités) et la décontamination de l'Uranium avant recyclage contamine 350 m^3 d'eau par jour (ensemble des opérations aux U.S.A.). Leur concentration en produits radioactifs est basse.
- Déchets solides (fûts de métal ayant contenu le minerai, matériel et conduits usés, les filtres des déchets, etc...). Ces déchets contiennent de très petites quantités de produits radioactifs : on les entrepose néanmoins dans des endroits réservés et surveillés.

4 - Préparation physique des combustibles :

On traite au cours de cette phase des mélanges d'U et d' UO_2 : leur radio-activité est insignifiante : 17 kilos d'Uranium enrichi à 90 % ont une radio-activité équivalente à 1 curie.

- Ces mélanges subissent : la fonte, le moulage, le laminage, l'usinage et une purification. Ces différentes opérations produisent :
- des poussières radioactives (très peu radioactives).
- des déchets solides : débris de cuivre, d'acier et d'Uranium (3,5 tonnes par an pour une pile de puissance moyenne). Le taux d'Uranium est de 3 pour 1.000.000 par rapport à l'acier et 0,5 pour 1.000.000 par rapport au

cuivre. L'Uranium est extrait à l'aide d'acides ; les déchets sont entreposés dans des fûts et isolés.

- des déchets liquides : 22 m^3 par an pour la même pile que précédemment. Leur niveau de radioactivité est si bas qu'ils sont d'emblée rejetés dans une rivière après dilution.

5 - Traitement des combustibles irradiés dans le réacteur :

Les plus grands volumes de déchets hautement radio-actifs de toutes les opérations de l'énergie atomique résultent du traitement chimique des combustibles irradiés des réacteurs, pour séparer le Plutonium de l'Uranium naturel et des produits de fission. Plusieurs procédés sont utilisés pour obtenir ces résultats : mais le principe de base est le même dans tous les cas. 4 phases principales :

1 - Stockage pendant 90 à 120 jours des produits de fission retirés du réacteur, pour permettre la désintégration des produits de fission à courtes périodes.

2 - Dissolution de l'ensemble des produits dans l'Acide Nitrique. Et la solution est dirigée sur une colonne.

3 - A partir de cette colonne,

- Par dissolution fractionnée (Tributyl-Phosphate ou Hexone), l'U et le Pu sont extraits sélectivement.

- A l'aide d'une solution (sel de NO_3H ou $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ ou les deux), les produits de fission sont entraînés avant qu'ils ne quittent la colonne. CETTE SOLUTION CONTIENT PLUS DE 99,9 % DES PRODUITS HAUTEMENT RADIOACTIFS de la fission. Elle sera évacuée et stockée.

Principaux Produits de Fission intéressant les Opérations

d'évacuation des déchets (I)

Radionuclides	Périodes	Maximum de Con- centration per- mise (2)		Pourcentage de Perte d'activité après un laps de temps de :		
		Dans le corps : μ c	Dans l'eau : μ c/ml	100 J.	3 ans	30 ans
Strontium 90.....	28 a.	2	1/10 ⁷	< 2	15	~ 49
Césium 137.....	26,6 a.	30	2/10 ⁵	< 2	15	~ 49
Promethium 147.....	2,6 a.	60	2,4/10 ⁴	3	15	< 1
Cerium-praseodinium 144	290 j.	5	1/10 ⁵	45	50	-----
Krypton 85 (Gaz).....	10,3 a.	-----	-----	< 1	1	1
Iode 131 (Gaz).....	8,1 j.	0,7	2/10 ⁶	< 1	-----	-----
Zirconium-niobium 95.....	63 j.	20	6/10 ⁵	33	-----	-----
Barium-lanthanum 140.....	12,8 j.	4	3/10 ⁵	< 1	-----	-----
Ruthenium-rhodium 103.....	41 j.	20	8/10 ⁵	5	-----	-----
Ruthenium-rhodium 106.....	1 a.	3	1/10 ⁵	2	3	-----
Strontium 89.....	54 j.	4	3/10 ⁵	7	-----	-----
Xenon 133 (Gaz).....	5,3 j.	-----	-----	< 1	-----	-----

(I) in "Nature of Radioactive Wastes" : F.L.Culler, ORNL - CF - 59. 1.106
26 Janvier 1959.

(2) in U.S. Bureau of Standards Handbook 1952.

TABLEAU I

EXTRACTION ET SEPARATION DES PRODUITS DE FISSION

Procédés	Application	Solvant sélectif (sép. U)	Solution de Sels (déchetts)	Volume de déchets ht radioactifs	Curie/gall	Vol.déchets en gall/gr U 235 consommé
PUREX	PU-U naturel	TBP dans l'hydro-carbone	NO_3H	3750 l/TM	1320	0,34
REDOX	?	Hexone	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	3785 l/TM	1720	0,27
HEXONE 25	U enrichi composés d'Al	Hexone	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	700 l/kg d'U enr.	1620 à 3940	0,31 à 0,13
TBP 25	?	TBP dans l'hydro-carbone	$\text{NO}_3\text{H} + \text{Al}(\text{NO}_3)_3$	670 l/kg d'U enr.	2580 à 5160	0,22 à 0,11
THOREX	Th-U 233	"	$\text{Al}(\text{NO}_3)_3$	5150 l/TM	81	0,34

D'après U.S.A.E.C.

In "Major Activities in the Atomic Energy Programs" Janvier 1960
(p. 297-298 : extraits)

- TM = Ton - Métrique ("Metric Ton" : Ton = 907,20 kg) d'U utilisé
- gallon = 31,7853
- TBP = Tributyl-Phosphate
- U enr = Uranium enrichi.

TABLEAU II

4 - U et Pu séparés sont décontaminés d'une façon plus complète et recyclés ; Pu peut être utilisé à des fins militaires. Cette décontamination produit une certaine quantité de déchets dont nous avons tenu compte au § 3.

- Les déchets liquides hautement radio-actifs seront, après évaporation, simple ou combinée à un traitement par l'Acide Nitrique, concentrés dans des fûts spéciaux et placés dans des endroits très isolés et loin des zones ayant quelques rapports avec l'activité humaine.

Nous donnons deux tableaux destinés à préciser la nature et le degré de radio-activité des produits de fission : le tableau I donne la liste des produits apparus au cours de la fission avec leur période et le taux de décroissance de leur activité au cours du temps. Le tableau II regroupe les données essentielles de la séparation chimique des produits extraits du réacteur. De ce dernier tableau, nous retiendrons essentiellement les données suivantes :

= 1 gr d'Uranium (non enrichi) utilisé donne en moyenne 1,3 litre de déchet ; 1 gr d'Uranium enrichi utilisé en donne 1,2 litre.

Ou encore : il y a production de

= 700 litres de déchets par kg d'Uranium enrichi,

= 3750 à 5150 litres de déchets par "ton-métrique" d'Uranium (environ 4.000 à 5.500 litres par tonne-métrique),

= La radio-activité des déchets produits varie entre 375 et 1.365 curies par litre,

= L'utilisation d'un gramme d'Uranium entraîne donc la production d'un déchet liquide dont l'activité sera au départ de 487 à 1.130 curies.

6 - Déchets produits par le réacteur et l'ensemble de l'Installation Nucléaire (en dehors de l'extraction des produits de fission) :

a - Déchets produits par le refroidisseur : (Eau sous pression).

.. De petites quantités de produits de fission peuvent se produire dans le liquide refroidisseur par deux mécanismes :

= de petites traces d'Uranium échappées du coeur peuvent être activées dans le liquide refroidisseur par les neutrons qui le traversent ;

= environ 1 % des produits de fission peuvent passer dans le refroidisseur directement par une légère fissure des gaines dans lesquelles sont contenues les barres de carburant. Les gaz s'en échapperont : ce sont le Xénon 133 et le Krypton 85 (dont les périodes respectives sont de 5,3 jours et 9,4 ans). Ils seront entraînés par un fort jet de gaz pour être stockés (60 jours) et rejetés dans l'atmosphère à des dilutions inférieures au dixième de la concentration maximum permise.

- Les particules provenant de la corrosion des gaines, des canalisations, sont activées et polluent l'eau servant au refroidissement.

- Enfin du Tritium se forme à partir de l'Hydroxyde de Lithium utilisé pour maintenir le pH du refroidisseur.

b - Déchets divers :

= liquides : rejetés par les laboratoires, les douches, le lessivage des vêtements, etc...

= solides : détritrus divers contaminés.

c - Autres sources d'effluents radio-actifs :

1 - Les Hôpitaux : Certains isotopes employés en thérapeutique sont rejetés en assez grande abondance : le Phosphore 32, l'Iode 131, l'Or 198.

2 - Les Etablissements de Recherche et les Laboratoires d'Université qui procèdent à des expériences avec des indicateurs marqués ; produisent des isotopes particuliers à l'aide de cyclotrons : ces effluents peuvent être considérés comme négligeables.

3 - Les transports de corps radio-actifs : Sauf en cas d'accident imputable aux moyens de transport, le transport de matières radio-actives peut produire une irradiation aiguë en cas d'imprudence, mais pas de contamination du milieu. Les précautions d'isolement de la substance radio-active et de manipulation à distance dans certains cas, sont évidemment de rigueur.

II - L'AMENAGEMENT DES DECHETS RADIOACTIFS

Dans l'état actuel des choses, se pose surtout pour les déchets des Installations productrices d'énergie et de Plutonium.

En vue de leur élimination, on classe les effluents en trois catégories : effluents à haut, moyen et bas niveaux radio-actifs, selon la concentration de ces effluents en éléments radio-actifs ou si l'on veut la quantité de curies par unité de volume.

L'exemple de Hanford (Washington) et éventuellement de Shippingport (Pennsylvanie) nous guideront dans notre description.

- La station de Hanford occupe une surface de 740 km^2 pour ses installations ; son activité s'étend sur 1.940 km^2 et ses contrôles sur 26000 km^2 le site est formé d'un haut plateau (1.100 m d'altitude) dans une région semi-désertique, entourée de montagnes (Cascade Range qui continue la Sierra Nevada à l'Ouest, les Rocheuses très à l'Est). Hanford utilise la Rivière Colombia qui se jette dans le Pacifique. Shippingport utilise l'Ohio, affluent du Mississippi qui se jette dans le Golfe du Mexique.

1 - Déchets à Hauts niveaux de radio-activité :

Ces déchets sont constitués essentiellement par les déchets liquides provenant des principales phases de la séparation des produits de fission.

- Hanford a produit 197000 m^3 d'effluents hautement radio-actifs jusqu'en 1959. Le total des déchets de même nature entreposés aux Etats-Unis à la même date est de 304.180 m^3 . On estime que dans vingt ans ce chiffre atteindra 460.000 m^3 .

Selon une publication en provenance d'Idaho, les effluents liquides entreposés atteindraient une concentration radio-active de plusieurs centaines à plusieurs milliers de curies par litre.

Ces déchets sont entreposés, après concentration, dans des fûts constitués d'aciers spéciaux et de ciment qui doivent résister pendant vingt ans au moins à la corrosion et aux hautes températures produites par les effluents qui y sont entreposés.

La totalité des effluents liquides entreposés jusqu'ici est absorbé par 170 fûts d'une capacité globale de 500.000 m^3 . L'installation d'un fût revient en moyenne à 365 millions de francs (anciens). On n'utilise que 60 % de cette capacité : en cas de fuite, un système de pompage télécommandé permet de déverser le contenu du fût endommagé dans un fût vide. Jusqu'ici aucun incident de ce genre ne s'est produit. Ces fûts sont placés dans une zone interdite, éloignée des populations. L'ensemble de ces zones interdites est étroitement surveillé par l'AEC qui a seule la charge du contrôle de la radio-activité ambiante. On prévoit que ces déchets ne devront pas être évacués avant un siècle.

L'entrepréhension des déchets à hauts niveaux radio-actifs, telle qu'elle est conçue actuellement ne pose pas de problèmes de contamination du moins dans l'immédiat. Mais le problème demeure angoissant pour deux raisons : il est difficile de savoir si ces fûts résisteront toujours à la corrosion due à l'acide nitrique qu'ils contiennent ainsi qu'à l'ion fluor, aux sulfates et aux chlorures et cette corrosion est favorisée par l'élévation constante de la température du liquide et par la décomposition de l'eau (décomposition radio-active avec production d' H_2O_2 et d' O_2). De plus cette décomposition peut provoquer des explosions si la ventilation du fût venait à être perturbée. Or on sait qu'après une dizaine d'années de stockage, il subsiste presque exclusivement du Strontium 90 et du Césium 137 émetteurs de rayons γ et métabolisés par l'homme, qu'on prend bien soin de ne jamais rejeter dans le milieu biologique. Ce danger évité grâce à des précautions minutieuses, une seconde difficulté demeure : elle est d'ordre financier (l'entrepréhension d'un litre de déchet revient de 13 à 62.000 frs.) et d'ordre pratique : il est difficile de concevoir une extension permanente des zones interdites. Or les prévisions aux Etats-Unis sont de 600.000 m^3 en 1990 et douze fois plus en l'an 2000. L'Angleterre produit actuellement 300.000 m^3 par an.

2 - Déchets à Niveaux de radio-activité Moyens :

Ce sont, par convention, des déchets 100 fois moins radio-actifs que les précédents.

- Hanford produit annuellement 11 millions de m³ d'effluents de niveaux moyens : 95 % des déchets de niveaux moyens et bas de toutes les installations américaines sont produits à Hanford.

- Ces effluents proviennent :

- . de l'eau qui a été utilisée dans les dernières étapes de la séparation des isotopes,
- . de la vapeur des cuves bouillantes qui s'est condensée,
- . des solutions qui épurent et absorbent les gaz,
- . des vieilles solutions d'où on a extrait les isotopes à longues périodes (Strontium, Cesium, etc...),

- Les effluents solides sont formés de divers détritits contaminés.

- Les effluents gazeux (lorsque le refroidisseur utilisé n'est pas gazeux) sont constitués par :

. l'Iode 131 et les deux isotopes de Ruthenium 103 et 106. La période respective de ces radio-éléments est : 8-9 jours, 41 jours, 1 an. Ils proviennent des dernières phases de la séparation des isotopes.

. Le Xénon 133 (5,2 jours), le Krypton (10 ans), qui peuvent provenir de fuites de gaines.

. le Brome 82 (35 heures).

. le Carbone 14 qui provient de l'Azote activé.

- Pour les effluents liquides, moyennement radio-actifs, il est difficile de procéder à une concentration par évaporation et condensation, car ils sont mêlés à plusieurs sortes de sels. On utilise dans certains centres divers procédés : filtration à travers des matières poreuses, coagulation (gels), précipitation.

Hanford utilise les avantages que lui procurent la constitution de son sol perméable (grande capacité d'absorption), sa faible pluviosité (mouvements des ions très lents à travers ce sol), son altitude (pas d'évacuation

vers la mer) et la faible densité de sa population. Les déchets liquides moyennement radio-actifs sont envoyés après dilution (addition d'eau ou d'isotopes stables correspondants) dans des buses poreuses appelées "cribs", profondément enterrées et disposées horizontalement. Les radio-éléments s'en échappent et diffusent à travers les sols. L'entraînement de ces effluents vers la Colombie se fait très lentement, du fait de la faible pluviosité : on estime que le temps mis pour y parvenir sera d'environ 50 ans. Leur activité alors très réduite le sera davantage par leur dilution dans l'immense masse d'eau de ce fleuve (le débit est de 2.268 m^3 à Pasco et de $5.526 \text{ m}^3/\text{sec.}$ à The Dalles, dans l'Oregon). Les contrôles de la radio-activité, tant en surface qu'en profondeur (à l'aide de puits, de sondages) permettent de suivre l'évolution des radio-isotopes : l'ordre de progression est le suivant : Ruthénium, Césium, Strontium. Une règle relativement récente a fixé à $3 \times 10^{-6} \text{ } \mu\text{c}/\text{cm}^3$ l'activité maximum tolérable au point de décharge de l'effluent, avec un plafond annuel maximum de 1,5 curie.

A Shippingport (87 m^3 de déchets liquides au total par an), les concentrations avant et après réduction d'activité sont les suivantes : Avant réduction de la radio-activité :

- . Effluents non volatils : $3 \text{ } \mu\text{c}/\text{cm}^3$,
- . Effluents gazeux : $10 \text{ } \mu\text{c}/\text{cm}^3$.

Après réduction de la radio-activité :

- . Effluents non volatils : $5 \times 10^{-5} \text{ } \mu\text{c}/\text{cm}^3$,
- . Effluents gazeux : $10^{-8} \text{ } \mu\text{c}/\text{cm}^3$.

A Hanford, les dosages pratiqués dans les environs, montrent que les taux d'exposition atteints sont de l'ordre de 3 à 15 % des DMA pour une exposition continuelle ; ces taux peuvent exceptionnellement atteindre 60 % de la DMA pour une exposition continuelle.

- Les effluents gazeux éliminés par les cheminées d'évacuation sont essentiellement ceux qui ont une longue période, c'est à dire le Krypton 85 et un peu de Carbone 14 qui provient de l'Azote activé.

Les autres gaz, y compris l'Iode 131 dont l'importance est grande du fait de sa fixation sur la Thyroïde, ne posent pas de graves problèmes

de contamination, car ils sont évacués à de très faibles concentrations radio-actives : rejet différé qui permet que soit épuisée la moitié de leur activité. Leur concentration qu'on peut évaluer au voisinage de la cheminée d'évacuation ou en tout autre point par l'équation de Sutton, ne dépasse jamais le $1/10$ de la concentration maximum permise.

Le Krypton 85 et le Carbone 14 sont fortement dilués avant leur rejet et leur concentration ne dépasse pas les C.M.P.

Cas de Brookhaven (Long Island - Ile de l'Atlantique située au large de New-York) : Brookhaven est un centre de recherche, dont le refroidisseur est l'air. Il se produit par activation de l'Argon 41. Ce gaz n'est pas métabolisé par l'organisme : il ne peut agir que par irradiation externe. Sa période est de 1,8 heure.

- En 1950, l'activité totale de l'Argon 41 produit s'élevait à 6.600 curies par jour, mais ces curies n'étaient produites que par tranches de 730 seulement. Ces 730 curies étaient diluées dans un débit d'air de $6240 \text{ m}^3/\text{mn}$ à travers une cheminée de 95 mètres de haut et dont la base s'élevait à 15 mètres au-dessus du sol. Ce qui avait pour résultat de produire une dose d'exposition de 50 mr/jour, soit deux fois la dose d'irradiation naturelle. La surveillance était et est toujours assurée par 15 stations munies de chambres d'ionisations, disposées autour du centre de Brookhaven. Dans chaque station se trouvaient également des compteurs Geiger, des systèmes d'enregistrement pour les mouvements et les densités des poussières radio-actives : des enregistrements photographiques se font toutes les 15 minutes. Une équipe de météorologistes recueillent toutes les données susceptibles d'intervenir sur le taux de décharge du gaz.

- En 1958, à la suite de l'utilisation d'Uranium enrichi, la production d'Argon est passée à 16.100 curies/jour, ce qui représentait à la sortie une concentration de 0,73 c/heure, qui est déversée après traitement (dilution après rétention) dans une cheminée de 38 mètres au sud de l'ancienne. La contamination est fonction du degré de pluviométrie.

A propos de l'irradiation par poussières et par radio-éléments gazeux, nous renvoyons aux notes qui suivent ce chapitre et qui tentent d'élucider la cinétique et le problème de l'absorption des poussières.

TABLEAU III

Concentrations de chaque Isotope dans l'eau de Rivière
à PASCO, Kennewick, en Décembre (I) 1957 (2)

Radionuclides	Périodes	Unités de 10^{-8} $\mu\text{c}/\text{cm}^3$
Sodium 24	15 h	110
Silicium 31	2,6 h....	0,22 (3)
Phosphore 32	14 j.....	3,5
Calcium 45	152 j.....	2
Scandium 46	85 j.....	3
Chrome 51 (R. Gamma)	28 j.....	1.000
Manganèse 56	2,5 h....	1,3 (3)
Fer 59	45 j.....	0,3
Cuivre 64 (42 % R. Gamma) ..	13 h.....	130
Zinc 65 (R. Gamma)	250 j.....	29
Arsenic 76	27 h.....	240
Strontium 89	53 j.....	2 (3)
Strontium 90	28 a.....	0,24 (3)
Iode 131	8 j.....	1,5
Barium 140	125 j.....	2,4
Neptunium 239	2,33 j...	370
Terres rares		34
Gross Beta		2.200

(1) Epoque où le débit de la Columbia River est le plus bas.

(2) D'après : "Radiation Exposure to people in the Environs of a Major Production Atomic Energy Plant" : J.W.HEALY, B.V. Andersen ; H.V. Cluckey and J.K.Slodat. (II th. I.C.P.U.A.E. Geneva, September 1958).

(3) Extrapolée à partir des mesures des effluents des réacteurs.

3 - Déchets à bas niveaux radio-actifs :

Ce sont des effluents 10 fois moins radioactifs que les précédents ou 1.000 fois moins radioactifs que les effluents hautement radioactifs.

Ils comprennent essentiellement :

- le liquide refroidisseur contaminé par son passage à travers les flux de neutrons ou les fuites occasionnées par quelques fissures (minimes) des gaines,

- la plupart des déchets solides.

Les isotopes du chrome, du fer, du cobalt et du zinc constituent la plus grande fraction des éléments dont la radio-activité a été induite. On trouve également des déchets de la corrosion de l'Aluminium.

A Hanford (110 millions de m^3 d'effluents à bas niveaux), les effluents liquides de cette catégorie sont d'abord amenés dans des bassins de rétention, où les liquides se refroidissent et perdent 50 % de leur activité, puis ils sont déversés dans la Colombia : 2.500 curies sont déversées chaque jour au voisinage de Pasco. Nous donnons dans le tableau III, les résultats des contrôles effectués dans la Colombia au niveau de son passage près de Pasco, qui se trouve en aval de Hanford à 35 km. de distance du point de déversement.

Les déchets solides à faibles niveaux, après décontamination (lavage) sont entreposés tels quels dans de grandes tranchées qui sont ensuite recouvertes de terre, ou dans des tunnels artificiels. Dans certains centres, on les abandonne dans des grottes ou des puits isolés.

4 - L'immersion des déchets :

L'AEC a immergé :

- Dans l'Océan Atlantique depuis 1951, 23.000 containers renfermant 8.000 curies.

- Dans l'Océan Pacifique, de 1946 à 1953, 21.000 containers et 329 blocs contenant 14.000 curies au large de Golden Gate et depuis 1953, 2.950 containers contenant 60 curies au large de Point Vicente.

L'immersion de produits de déchets radioactifs doit respecter certains impératifs rigoureux :

1 - Les effluents liquides de hauts niveaux radio-actifs ne sont jamais déversés. Les autres doivent toujours être solidifiés et la masse de déchets ne doit comporter aucun vide ou interstice et doit être très dense.

2 - Seuls, les effluents qui seraient "à terre" considérés comme ayant un taux moyen ou bas d'activité peuvent être préparés pour être immergés.

3 - Les containers doivent avoir une densité minimum de 1,2 (ceci correspond à 10 pounds/gallon ; un **avoirdupois** pound = 453,59 gr. 1 gallon U.S. = 3,7853 l).

4 - L'immersion doit se faire par 1.828 mètres (1.000 fathom) de fond au moins.

5 - Les déchets inflammables doivent occuper un volume d'environ $1 \text{ dm}^2 \times 5 \text{ dm}$.

6 - L'enrobement des déchets solidifiés doit être en ciment et pouvoir résister à de très fortes pressions.

Des tests pratiqués sur la côte du Massachusetts près de Woods Hole ont montré que la vitesse de descente des blocs ou des containers ainsi préparés était de 27,35 km/heure. On avait immergé des isotopes équivalents aux isotopes radio-actifs et teintés de différentes couleurs pour observer les fuites possibles : il n'y en eut pas.

Le principe de la non immersion d'effluents liquides pose celui de la contamination des estuaires par les rejets en rivières : en fait au moment où elle se jette dans le Pacifique la Colombia présente une concentration qui est à peine égale à celle de Pasco/2,5.

Tout ceci pour répondre aux objections des océanographes qui affirment ne pas pouvoir prévoir le sort de ces objets et le cheminement de la radio-activité éventuellement libérée, par fissuration thermique ou chimique, dans la circulation océanographique.

LES POLLUTIONS RADIOACTIVES DE L'ENVIRONNEMENT

==

Les différentes formes de pollution radio-active de l'environnement représentent la contre-partie inéluctable des avantages que procure l'exploitation de l'énergie atomique. Pour dresser le tableau général de cette pollution, il convient d'étudier l'aspect de cette pollution :

- autour des sites nucléaires et dans les zones qu'ils contrôlent,
- dans les milieux qui en sont éloignés et dans lesquels vivent de larges couches de population.

Avant de nous attacher à mettre en évidence les caractéristiques importantes de l'état actuel de cette pollution, nous tenterons de préciser les données concernant :

- l'évaluation de la pollution de l'eau,
- les processus de la contamination des milieux biologiques,
- le mécanisme d'action des poussières contaminées et l'échantillonnage de l'air.

MODES D'EVALUATION DE LA POLLUTION DES EAUX

--

I - PRINCIPE DES DOSAGES D'UNE EAU NATURELLE

Pour apprécier la radio-activité d'une eau naturelle, il convient de doser :

- les têtes de famille : Thorium 232, Uranium 235 et 38,
- le Radium,
- les Radons.

1 - Le dosage de l'Uranium ($U_{235}/U_{238} = 7/1.000$) se fait :

- soit par activation,
- soit en utilisant la propriété de son fluorure d'être fluorescent sous l'influence des rayons U.V.

2 - Le dosage du Radium et des Radons :

- On utilise la propriété qu'ont le radium et le radon 226 d'atteindre leur équilibre en un temps court.

- Le radon, émetteur de rayons α est dosé à l'aide d'une chambre d'ionisation ou d'un scintillateur.

- L'étalonnage se fait à l'aide du radon provenant de solutions contenant des quantités connues de Radium.

- Activité radium = Activité Radon en équilibre avec Radium,
- Radon total = Radon non en équilibre + Radon en équilibre.

3 - Le dosage du Thorium 232 se fait :

1 - par Spectrophotométrie ($> 5 \mu g$) : à l'aide du Thorin (Arsénophénylazo 2 naphtol 3-6 acide disulfonique) qui provoque une coloration rouge.

2 - par Spectrographie à l'arc de graphite (I à $10 \mu g$).

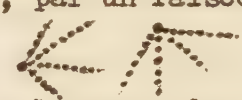
3 - en utilisant le rayonnement α de son émanation, le Thoron.

4 - en activant le Thorium 232 : l'activité β du Thorium 233 est mesurée par un compteur Geiger.

5 - par autoradiographie :

- L'examen des traces de particules α peut fournir des renseignements précieux sur l'identification des atomes qui leur ont donné naissance.

= un thorium ou un uranium à longue période seront représentés par une portion de droite faite de points accolés. 

= un radon, un produit actif déposé, par un faisceau de petits points ayant un point unique pour origine. 

- On peut en appréciant au microscope la longueur des trajectoires, connaître l'énergie des particules, donc le corps qui leur a donné naissance:

Thorium 232 = 4,20 MeV $\longrightarrow$ 2,6 cm dans l'air.

II - RADIOACTIVITE ARTIFICIELLE DES EAUX NATURELLES

- Les eaux de pluie sont toujours plus radio-actives que les eaux de surface ou les eaux infiltrées dans les sols.

- une rétention de corps radio-actifs se produit au niveau :

. des constituants du sol : le cheminement de la surface vers la profondeur entraîne l'absorption successive des corps suivants : Plutonium (très faible diffusion), terres rares, Strontium, Césium, Ruthénium 103 (grande diffusion). Dans le sens horizontal, au cours de son parcours dans

une rivière, l'eau cède son activité par absorption ou par échange d'ions.

- . de l'humus,
- . de la végétation.

III - PRINCIPE DES DOSAGES D'UNE EAU POLLUEE

= Origines de la pollution :

1 - Les Utilisateurs d'isotopes :

- Hôpitaux : Phosphore 32 (14, 3 J.), or 98 (2,6 J), Iode 131 (8 j),
Soufre 35 : ce sont tous des radio-isotopes de périodes
courtes.

- Fabricants de peinture phosphorescente : sels de Radium.

- Industriels : au cours de leurs essais de débit, d'étanchéité,
utilisent le Sodium 24, le Brome 82.

- Centres de recherches nucléaires : toute la gamme des isotopes
radio-actifs, mais surtout le Phosphore 32, le Brome 82 (35, 9 H) et le
Sodium 24 (15 H).

2 - Les Centres Nucléaires :

- La plus grave pollution des eaux est due aux produits de fission.

- Nous avons vu que les effluents liquides subissaient avant leur
entreposition ou leur rejet une décontamination :

. soit évaporation en vase clos pour les produits à hauts
niveaux : la décontamination obtenue est de 10^5 à 10^7 .

. soit par précipitation et floculation, pour les produits de
niveau moyen : la décontamination atteint dans ce cas 20 à 100.

= Principes des Dosages :

1 - On ne détermine pas l'activité totale α , β , γ ,

. qui ne tient pas compte du danger propre à chaque élément
(variable avec son degré d'absorption intestinale, son métabolisme, etc..)

BILAN DES RADIO-ISOTOPES DE PERIODE SUPERIEURE A 10 JOURS

Eléments		Nature de l'émission principale		Période		Niveau admissible $\mu\text{ic/cm}^3$
Substance mère	Substance fille	Mère	Fille	Mère	Fille	
^{137}Cs	^{137}Ba	γ	X	33 a	2,6 m	$2 \cdot 10^{-4}$
^{95}Zr	^{95}Nb	γ	β	65 j	90 h	$6 \cdot 10^{-5}$
^{144}Ce	^{144}Pr	γ	β	290 j	17 mn	$1 \cdot 10^{-5}$
^{106}Ru	^{106}Rh	β	γ	1 a	30 sec	$1 \cdot 10^{-5}$
^{103}Ru	^{103}Rh	β	X	39,8 j	57 mn	$2 \cdot 10^{-4}$
^{147}Pm	^{147}Sm	β	α	2,26 a	$6,7 \cdot 10^{11}$ a	$2 \cdot 10^{-4}$
^{90}Sr	^{90}Y	β	β	25 a	65 h	$8 \cdot 10^{-8}$
^{89}Sr	^{89}Y	β	Stable	54 j		$7 \cdot 10^{-6}$

In "Disposal of Waste Materials".

. qui ne tient pas compte du fait que la charge radio-active peut être en partie absorbée par les éléments minéraux de l'eau, mais on doit, après séparation, apprécier l'activité de chaque élément des produits de fission.

Compte tenu de l'épuration avant rejet, il y aura lieu de rechercher les éléments indiqués dans le tableau ci-contre, dont la période est supérieure à dix jours.

2 - Séparation et recherche des corps radio-actifs :

Une eau radio-activement polluée peut être considérée comme formée de trois parties comprenant :

- des matières solides macroscopiques en suspension,
- des matières colloïdales en pseudo-solution,
- des solutions de sels minéraux et de matières organiques.

Après évaporation préalable, on obtient :

- après centrifugation de l'eau brute : la radio-activité des matières en suspension,
- après floculation et filtration (ou centrifugation) : la radio-activité des matières colloïdales,
- après passage sur des résines :
 - . les résines absorbent les sels radio-actifs,
 - . l'eau résiduelle contient la radio-activité des matières organiques.

3 - Principes de Mesure :

= Emetteurs γ :

La moitié des produits de fission susceptibles d'être rencontrés dans les eaux résiduaires sont émetteurs γ . On dose cette émission γ à l'aide d'un Cristal à puits enfermé dans un château de plomb.

Un radio-élément ayant une activité de 200 coups/minute - maximum "sur un pic", donne un spectrogramme. (Voir page suivante)

Compte tenu du coefficient d'efficacité du cristal (qui varie avec l'énergie des γ et le volume de l'échantillon) 200 coups/minute correspondent à $4,5 \times 10^{-4}$ μc .

On peut déceler jusqu'à 5×10^{-7} $\mu\text{c}/\text{cm}^3$: cette quantité est inférieure à la dose de tolérance de la plupart des émetteurs β et γ des produits de fission, à l'exception du Strontium 90 (qui n'est pas émetteur γ d'ailleurs).

Des tables donnent le mode de désintégration, les niveaux d'énergie et le pourcentage à chaque niveau ("The Review of Modern Physics" Avril 1958).

- Emetteurs β :

Après extraction des déchets, on procède successivement :

- à un comptage global,

- à une courbe d'absorption par écrans d'aluminium (5 à 775 mg/cm^3)

La courbe d'absorption n'est utilisable que s'il s'agit d'émetteurs β purs ou d'énergie très différente. Si on a des émetteurs β d'énergies voisines, il faut les séparer.

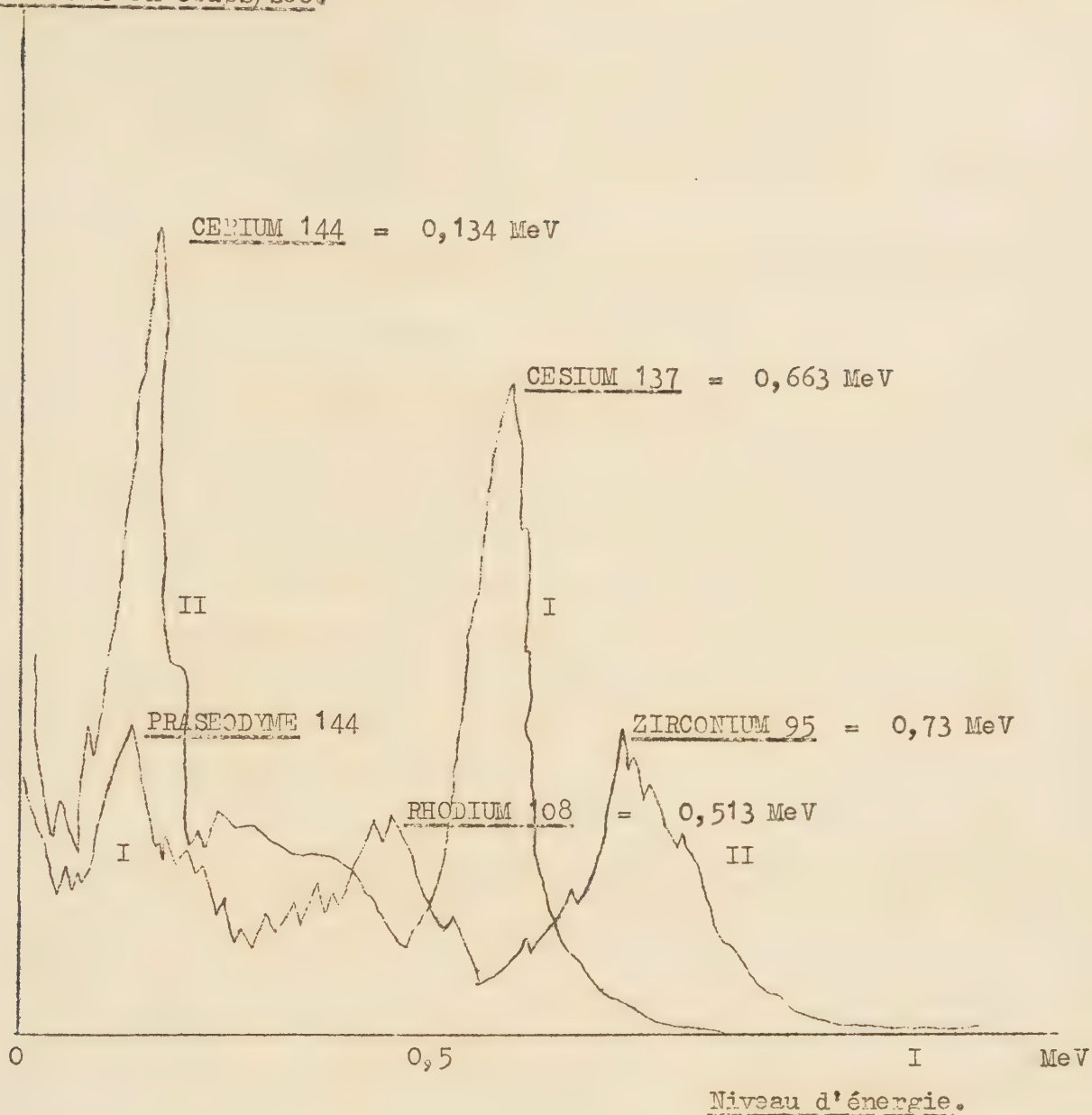
Parmi les émetteurs β , le Strontium 90 est le plus dangereux : si on le soupçonne, il faut le séparer.

- Emetteurs α :

Ils proviennent des combustibles naturels utilisables dans les réacteurs U 238, U 235, Th 232, et des transuraniens, dont le plus important est le Plutonium (émetteur α).

- Pour l'Uranium et le Thorium, on procède comme pour les eaux naturelles.

- Pour le Plutonium, on procède à la séparation par précipitation à l'aide de l'Acide Fluorhydrique (précédée d'une concentration à l'Acide de Cupferron si nécessaire) et on compte les α à l'aide d'un compteur proportionnel ou d'un scintillateur.



(D'après X. Buron, "Radioactivité", France-Sélection Edit., p 297)

SPECTROGRAMME D'UN EFFLUENT CONTENANT Cs 137, Ce 144, Pr 144, et peut-être Zr 95 et Rh 106.

I = Effluent au point d'arrivée à l'égout

II = Effluent 3 km plus loin : on ne retrouve pas la même tranche d'eau.

(II n'y a pas de Césium dans le second prélèvement ; les deux pics ébauchés pourraient représenter du Zr 95 et du Rh 106).

LES PROCESSUS DE CONTAMINATION DES MILIEUX BIOLOGIQUES ET DES ALIMENTS

Nous envisagerons successivement :

- La contamination des communautés biologiques aquatiques,
- La contamination des communautés terrestres,
- La contamination alimentaire.

I - CONTAMINATION DES COMMUNAUTES BIOLOGIQUES AQUATIQUES

A - Dans la Rivière Colombia :

- Les activités spécifiques sont plus élevées chez les êtres aquatiques que dans l'eau qui constitue leur milieu. Cette contamination s'étend aux animaux qui vivent près du milieu contaminé (oiseaux).

- Le pouvoir de concentration (P.C.) dépend :

a - De l'embranchement : les espèces inférieures (algues, bactéries) ont un grand P.C., car il y a absorption et adsorption proportionnelle à la surface.

b - Du métabolisme propre à l'espèce considérée ; en s'élevant dans la hiérarchie animale :

- . le PC du Sodium augmente,
- . le PC du Cuivre diminue,
- . le PC du Césium augmente,
- . le PC du Phosphore ne varie pas (mais le milieu est carencé en phosphore),
- . les insectivores concentrent plus que les piscivores.

c - Du temps qui s'écoule depuis la contamination.

B - Dans une prairie arrosée par la Colombia River :

On a étudié surtout la concentration du Zinc 65.

Le PC suit la progression suivante :

- Plantes cultivées, légumes (PC = 2,5)

- Produits des animaux qui paissent dans l'herbe de la prairie (PC = 26). Le lait surtout sera contaminé, la viande (muscles) le sera moins.

- Herbe (PC = 44).

Nous retiendrons donc :

- Le haut pouvoir de concentration des bactéries (PC = 100 à 1000) et des algues.

- Le pouvoir de concentration des animaux qui pourvoient à nos besoins alimentaires (lait : PC = 26 ; viande : PC = 2,5) et des plantes comestibles (légumes : PC = 2,5).

II - CONTAMINATION DES COMMUNAUTES TERRESTRES

Les sols fixent les radio-éléments par échange d'ions.

Les plantes puisent dans cette réserve en fonction de leurs besoins.

A - Contamination des Plantes :

a - La concentration en Strontium dans la plante augmente quand celle du Calcium dans le sol diminue et inversement. La Plante préfère le Calcium au Strontium.

Le rapport
$$\frac{(\text{Sr/Ca}) \text{ plante}}{(\text{Sr/Ca}) \text{ sol}} = 0,8$$
 est pratiquement constant

tant que la concentration en Calcium du sol ne dépasse pas sa capacité d'échange.

b - On observe un phénomène un peu semblable en ce qui concerne le rapport Césium/Potassium, mais dans ce cas la plante absorbe très peu de Cs, car celui-ci est fixé par le sol et le Potassium peut le déplacer.

c - La plante concentre davantage le Sr et le Cs dans ses feuilles que dans ses fruits.

d - La plante peut être contaminée par voie externe.

B - Contamination des Animaux et de l'Homme :

= Contamination Aérienne :

Les diamètres des particules vectrices déterminent leur pouvoir de pénétration et la masse de la particule son lieu de dépôt : le pouvoir de pénétration est fonction de ρd^2 (ρ = densité, d = volume).

- Les petites particules pénètrent mieux,
- Les particules légères seront inhalées et passeront dans le sang,
- Les particules lourdes seront dégluties,
- les gaz se dissolvent dans le sang.

= Contamination par ingestion :

a- La contamination est fonction du mode d'alimentation : elle croît selon que l'animal est herbivore, granivore, carnivore.

b - L'homme préfère le Calcium au Strontium.

c - La concentration osseuse est inverse de l'âge : l'enfant concentre davantage de Strontium 90 que l'homme : 70 Sunshine Units de 0 à 5 ans - 26 S.U. de 5 à 25 ans en moyenne ; 6.S.U. chez les gens âgés (la C.M.P. est de 100 S.U.)

d - Elle varie avec les saisons : le pouvoir de concentration est maximum au printemps.

En conclusion, l'homme est favorisé :

- A chaque stade de la Chaîne nutritionnelle il y a diminution du pouvoir de concentration (sauf pour les alcalins).
- Il consomme plus de graines que de feuilles,
- Il consomme les parties musculaires des animaux qui concentrent moins que les os ou la thyroïde.

III - LA CONTAMINATION ALIMENTAIRE

La concentration radioactive des aliments habituellement consommés par l'homme doit être assez faible pour ne pas entraîner les effets retardés des Radiations Ionisantes :

- Vieillissement prématuré et raccourcissement de la durée de vie,
- Induction de leucémies ou de tumeurs,
- Altérations génétiques se répercutant sur les descendants.

En matière d'alimentation, il n'existe pas comme pour l'eau et l'air de concentration maximum permise recommandée par l'ICRP.

Les facteurs qui permettent de porter un jugement sur la nocivité possible d'un aliment donné, sont de trois ordres :

a - On admet que l'absorption intestinale est :

- . pour le Césium, de 100%,
- . pour l'Iode, supérieure à 50%,
- . pour le Plutonium, de 1%.

b - La C.M.P. en S.U. : le taux de fixation du Strontium 90 est lié à la teneur en calcium de l'organisme, elle-même en rapport étroit avec la richesse en Calcium de l'alimentation. Le Strontium se fixera d'autant plus facilement qu'il entrera moins en compétition avec le Calcium, mais le rapport Sr/Ca du consommateur sera toujours inférieur à celui de l'aliment. Il faut donc que le rapport Sr/Ca de l'aliment soit inférieur à la C.M.P. en S.U. pour l'ensemble de la population (= 100 S.U.)

c - La quantité d'aliments consommés : étant donné que les diverses sortes d'alimentation qui existent dans le monde présentent de très grandes différences, il est difficile d'établir une règle générale. On peut admettre que la C.M.P. pour un aliment donné soit égale à celle de l'eau. La consommation moyenne de celle-ci par 24 heures est de 1.500 gr. Si la radioactivité de l'aliment considéré est de $q \text{ } \mu\text{c/cm}^3$, la quantité d'aliment qui pourra être consommée, si le taux de sa radioactivité est constant sera alors donné par la relation :

$$Q_{\text{gr}} = \frac{\text{C.M.P. (eau)} \times 1500}{q}$$

MECANISME D'ACTION DES PARTICULES RADIOACTIVES INHALEES ET ECHANTILLONNAGE DE L'AIR

LE DEPOT DES POUSSIERES INHALEES DANS L'ORGANISME

A partir de considérations théoriques et expérimentales, Eisenbud a établi que les particules de poussières inhalées peuvent se déposer sur le tractus respiratoire selon les mécanismes suivants :

1 - IMPACT PAR INERTIE

Ce mécanisme est important pour les conduits nasaux et la partie haute de l'arbre bronchique dans lesquels l'air se déplace avec une vitesse assez grande. Les particules peuvent être projetées sur le revêtement muqueux des Bronches par les brusques changements de direction du courant aérien dans l'arbre bronchique. Les particules les plus grandes sont plus propres à être séparées de cette façon, car l'effet d'inertie sur la particule est proportionnel à ρd^2 , ρ étant la densité et d le diamètre de la particule.

2 - SEDIMENTATION

Dans les parties plus profondes du poumon, où les lumières sont étroites, l'air se déplace plus lentement : le dépôt des petites particules se fera par gravitation.

3 - LE MOUVEMENT BROWNIEN

Il y a si peu de déplacement d'air dans les espaces alvéolaires que, seul le mouvement brownien semble susceptible de provoquer la fixation des particules trop petites ($0,1 \mu$ de diamètre) sur lesquelles la gravitation ne peut agir.

La MASSE de la particule est donc le facteur prédominant qui déterminera le lieu de son dépôt.

Pour un aérosol, dont les particules ont une densité approximativement égale, ce sera LA TAILLE de la particule qu'il faudra considérer.

= En 1940, Van Wijk et Patterson ont étudié l'influence de la taille de la particule sur la rétention des poussières des mines dans les poumons de différents sujets. Ils ne différencient pas leurs estimations selon qu'il s'agisse de la partie haute ou basse du poumon : leurs résultats se rapportent au dépôt global des particules dans le poumon et sont représentés par la courbe (I) de la figure.

= Wilson et La Mer en 1948, Brown en 1950, Landahl en 1948 et 1951 ont également étudié le problème des dépôts alvéolaires en fonction de la taille des particules : leurs conclusions sont résumées sur la figure. Celles-ci ne sont pas tout à fait comparables entre elles, du fait que les densités des poussières expérimentales et les capacités pulmonaires des sujets n'étaient pas équivalentes dans chaque groupe de ces expériences.

Landahl a montré que les rétentions d'aérosols de densités différentes peuvent se comparer si l'on exprime la taille des particules sous la forme de "DIAMETRE D'IMPACT EQUIVALENT" = diamètre x densité^{1/2}. A partir de cette base, les maximum, pour les courbes de Landahl d'une part et celles de Wilson et La Mer d'autre part, demeurent inchangées. Pour la courbe de Brown, le DIE relatif à la rétention maximum est à peu près de 2μ .

Cette figure montre la concordance qui existe entre ces trois groupes de résultats en ce qui concerne la partie basse des poumons, c'est à dire pour les dépôts de particules de $2,5$ à 5μ de diamètre. Il faudrait d'autres

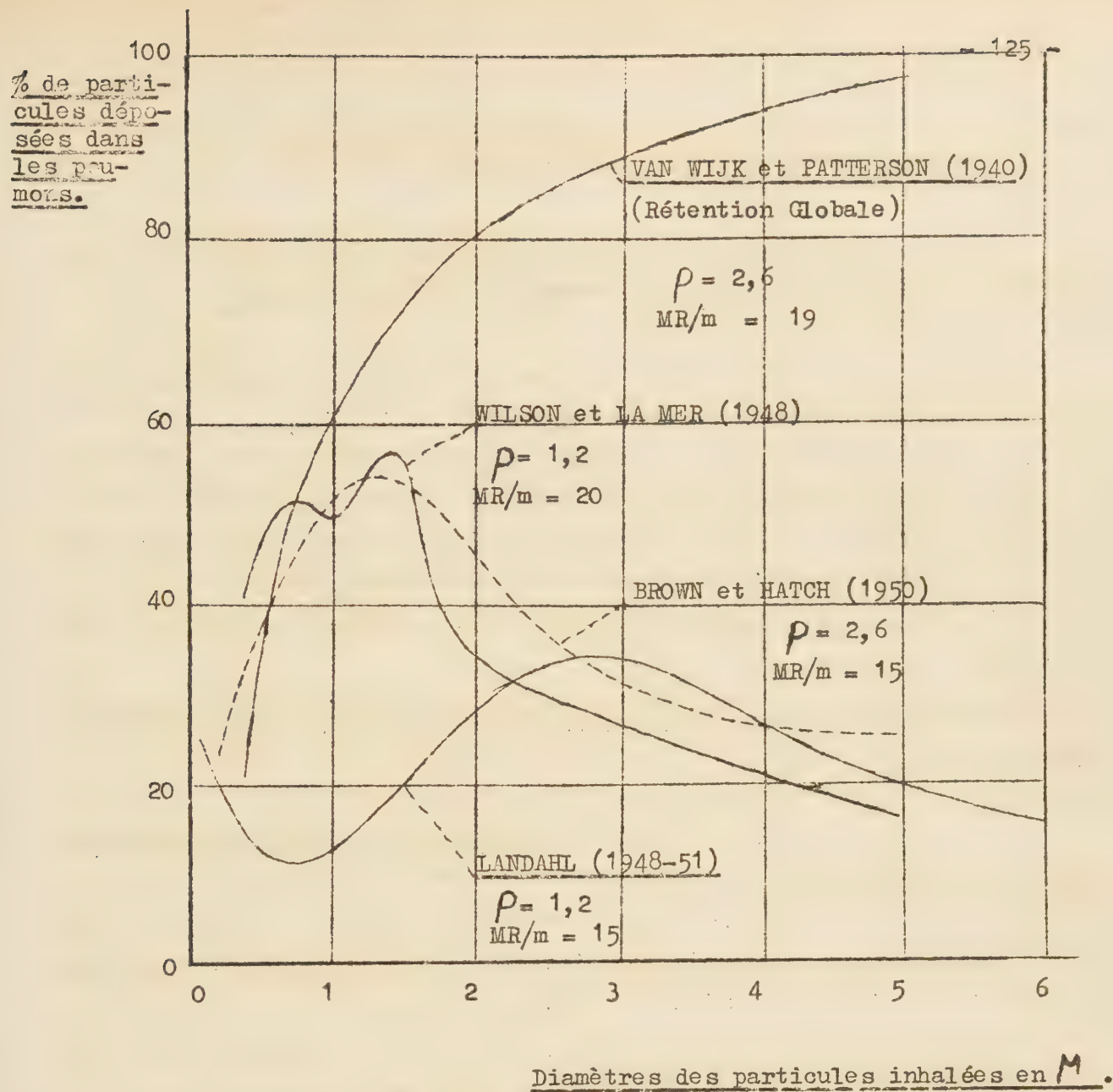


FIGURE I : DEPOTS PULMONAIRES DE PARTICULES INHALEES EN FONCTION DE LEURS DIAMETRES.

La Courbe de Van Wijk et Patterson se rapporte aux dépôts des particules dans l'ensemble du poumon.

Les autres Courbes se rapportent aux seuls dépôts alvéolaires.

(d'après : M. Eisenbud : "Retention, distribution and elimination of inhaled particulates", Arch, Ind. Hyg. and Occup. Med., 6-214, 1952).

ρ = densité des particules.

MR/m = Nombre de Mouvements Respiratoires par minute.

recherches pour éclaircir le cas des particules de 1 à 2 μ qui sont celles que l'on rencontre couramment dans l'atmosphère.

= Les taux maximum des dépôts de particules inhalées, dont les diamètres s'échelonnent de 2,5 à 5 μ varient donc de 30 à 55 %.

= Pour les poussières dont les densités varient de 1,2 à 2,6, les dépôts maximum se produisent pour les diamètres de 1 à 2 μ : ce sont les diamètres moyens des nuages de poussière fréquemment rencontrés. Cependant la plupart des poussières émettrices de rayons α ont une densité un peu plus élevée. UO_2 a une densité supérieure à 9. La notion de DIE montre qu'un nuage de poussière dont l'ensemble des diamètres moyens est de 2 μ , se comportera comme si ses particules avaient 6 μ dans les courbes de Wilson et de Brown.

Pour les poussières de métaux lourds, les dépôts maximum sont donc voisins de 10 %.

= Landahl et coll. ont mesuré la pénétration nasale en fonction de la taille des particules. Ces expériences ont été faites avec des substances diverses : quand la taille de ces particules est exprimée en DIE, les résultats s'inscrivent sur une courbe sigmoïde concordant avec la courbe théorique de pénétration qu'avait calculée Landahl.

Cette pénétration nasale est de : 50 % pour les particules de 6 μ ,
: 25 % pour les particules de 10 μ ,
: 90 % pour les particules de 1 μ .

Ces données soulignent le rôle protecteur de la muqueuse nasale pour les poumons, contre la pénétration des particules plus grandes que 5 μ . On conçoit que, corollairement, la respiration buccale puisse modifier d'une façon très sensible les caractéristiques de la rétention pulmonaire.

L'ELIMINATION DES PARTICULES INHALEES

L'élimination des poussières déposées sur le trajet des voies respiratoires peut se faire :

- par phagocytose,

- par action des cils,
- par dissolution dans le mucus bronchique.

- La phagocytose est le propre des alvéoles.

- L'action ciliaire prédomine dans la partie supérieure de l'arbre respiratoire.

= Après absorption d'une particule, un phagocyte peut errer dans l'alvéole ; en sortir et remonter l'arbre bronchique jusqu'à devenir accessible à l'épithélium cilié ; ou être drainé par le système lymphatique. Les mécanismes grâce auxquels une poussière est éliminée des ganglions lymphatiques n'ont pas encore été élucidés : il semble que les particules ne séjournent pas en permanence dans ces ganglions. Cette hypothèse résulte de l'observation histologique des poumons de travailleurs qui avaient séjourné presque toute leur vie dans des milieux "poussiéreux" : on ne recueille que 10 à 20 gr. de cendre minérale dans les poumons d'un silicotique, ce qui représente 1 % seulement de la poussière déposée dans les poumons au cours d'une vie de travail.

En 1949, Hodge, examinant les résultats de l'analyse chimique pratiquée sur des chiens qui avaient été exposés à l' UO_2 , émet l'hypothèse que pour l' UO_2 , extrait des ganglions lymphatiques pulmonaires la période biologique est de l'ordre de 100 jours.

= Les particules déposées sur l'épithélium cilié de la partie haute des voies respiratoires, peuvent être rejetées relativement vite.

- Selon Barclay et Franklin, ces particules sont repoussées vers le haut de l'arbre bronchique, au rythme de 0,25 à 1 cm/mn. dans les Bronches et de 3 cm/mn. dans la Trachée.

- Albert et Arnett ont publié en 1955 les résultats de leurs études sur les taux de clearance bronchique de sujets ayant respiré de petites doses de Fer radioactif portées par des particules dont le diamètre moyen avait 2 à 3,5 μ . Ils ont observé que :

- | | | |
|--------|-----------------------------|--------------------------------------|
| . 87 % | des particules de 3,5 μ | étaient éliminées entre 1,9 et 2,3h. |
| . 47 % | " 2 μ | " 1,6 et 4h. |

Dans les deux cas, la clearance bronchique se ralentit considérablement au bout de 2 heures.

Les auteurs en concluent que l'épithélium bronchique est cause de l'élimination rapide du début, c'est à dire des deux premières heures.

Cette expérience semble aussi illustrer l'effet de la densité des particules sur la répartition des poussières entre l'épithélium et les alvéoles.

= Le rôle de la dissolution des particules par le Mucus, dans la clearance pulmonaire, n'est pas pris en considération si ces particules sont insolubles.

Les particules solubles disparaissent du poumon.

Lorsqu'il s'agit d' UO_2 - dont les particules ont une vitesse de solubilité de 10 à 100 particules/mn - ces mécanismes ne jouent pas habituellement un rôle important. Cependant on retrouve ces particules dans un état finement pulvérisé et l'on sait que par un processus d'excrétion le mucus tend à se maintenir à une concentration toujours au dessous des niveaux de saturation.

= Nous avons vu que le mécanisme d'expulsion ganglionnaire est inconnu.

SPECTRE DE LA TAILLE DES PARTICULES EN SUSPENSION DANS L'AIR

La limite supérieure du spectre de la taille des particules est déterminée par le rythme auquel les particules se déposent par gravitation.

- Une particule de 10μ dont la densité est 1 se déposera à un rythme d'environ 18 cm/mn., tandis qu'une particule de 1μ se déposera au rythme de 0,21 cm/mn.

- A partir de $0,1 \mu$ une particule se comporte comme une molécule gazeuse et est sujette au mouvement brownien, mais non au dépôt par gravitation.

- Les particules les plus grandes se déposent rapidement, tandis que les plus petites (I μ) restent en suspension dans l'air pendant longtemps.

- La majorité des diamètres moyens sont habituellement inférieurs à ceux pour lesquels la rétention alvéolaire est maximum.

-o-

ECHANTILLONNAGE DE L'AIR

L'échantillonnage de l'air contenant des poussières radio-actives est effectué de plusieurs manières. Les appareils sont classés d'après le mécanisme utilisé pour la séparation des poussières :

- précipitation électrostatique,
- précipitation thermique,
- "impaction",
- filtration.

1 - La précipitation électrostatique est une méthode hautement efficace mais exige un appareillage encombrant et une surveillance permanente : on ne l'utilise que dans des laboratoires hautement spécialisés.

2 - La précipitation thermique est basée sur le principe suivant : lorsque la poussière traverse une rampe thermique, elle tend à se déplacer vers les zones où la température est la plus basse. Son inconvénient est que les échantillons doivent être recueillis pendant un temps trop long, car le débit d'air optimum doit être bas.

3 - Les Impactors sont largement utilisés, en hygiène, mais se prêtent mal à l'échantillonnage des poussières radio-actives.

Une exception : l'impactor à cascades utilisé pour la détermination de la taille des particules.

4 - La filtration : C'est la méthode de choix, la plus souvent utilisée pour l'extraction et la séparation des poussières radio-actives.

La caractéristique importante d'un appareil d'échantillonnage est le débit d'air qui traverse l'appareil. Car il est nécessaire que l'échantillon recueilli en 1 ou 2 minutes, présente une radio-activité suffisante pour qu'il soit possible de la doser à l'aide des appareils de mesure en un laps de temps raisonnable.

Dans la plupart des cas un débit de 25-30 litres/mn est satisfaisant et l'on dose les échantillons recueillis pendant 10 minutes ou davantage.

- Les appareils pour échantillonnage d'un volume d'air bas ont un débit d'air de 30 l/mn. L'activité α et β est dosée directement.

- Les appareils pour échantillonnage d'un grand volume d'air ont un débit pouvant s'élever à 22 m³/mn.

L'EQUATION DE SUTTON

L'équation de Sutton (1947) permet de prévoir la concentration d'un effluent en n'importe quel point du lieu où se produit le rejet. L'équation suivante est une forme simplifiée de l'équation de Sutton, utilisable pour le calcul d'une concentration au niveau du sol :

$$G = \frac{2.000 Q}{n c_y c_z \mu x^{1,75}} e^{-\left(\frac{h^2}{c_z^2 x^{1,75}}\right)}$$

dans laquelle :

G = Concentration au niveau du sol en mc/m³.

Q = Quantité de curies/sec. rejetées par la cheminée.

h = Hauteur de la cheminée en mètres.

μ = Vitesse du vent en mètres/sec.

X = Distance qui sépare le point où s'effectue la mesure de la cheminée d'évacuation.

C_y , C_z = Coefficients de diffusion, variables avec les conditions météorologiques.

De cette équation, on déduit que la concentration maximum sera :

$$G_{Max.} = \frac{2.000 Q C_z}{e \pi h^2 \mu C_y}$$

et que cette concentration se trouvera à une distance $X_{Max.}$ du point de rejet, tel que :

$$X = \left(\frac{h}{C_z} \right)^{1,14}.$$

LA POLLUTION RADIOACTIVE AUX ENVIRONS DES SITES

--

La pollution radio-active autour des sites est assurée de manière à ce que soient respectées les normes secondaires de l'ICRP.

Nous avons vu que celles-ci concernent l'homme et l'environnement. Nous avons exposé dans une partie antérieure de ce travail la manière dont il fallait interpréter les doses EBR maximum admissibles et les concentrations maximum permises dans l'eau ou l'air pour chaque élément. Il nous reste pour être complet, à faire état des normes de rejet des effluents : normes qui, en quelque sorte, conditionnent et renforcent les autres normes et surtout celles qui s'appliquent à une large couche de population.

1 - Le rejet des effluents liquides des installations d'un centre atomique vers l'extérieur, est soumis aux limitations suivantes :

- La quantité de Strontium 90 rejetée ne doit pas dépasser 0,7 curie/mois/station.

- Les autres éléments émetteurs de β et non volatils ne doivent pas excéder 10 curies/mois/station.

- Les émetteurs α ne doivent pas dépasser 0,7 c/mois/station.

2 - Les effluents liquides contenant de l'huile ou des produits chimiques en provenance du réacteur et destinés à être dilués dans des fosses sont soumis aux limitations suivantes :

- Le Plutonium ne doit pas excéder 4 mc/mois/station.

- Le Strontium 90 " 35 "

- L'ensemble des émetteurs β de période supérieure à 15 jours ne doivent pas excéder 1 c/mois/station.

Le lieu où doivent être créées les fosses où seront déposés les effluents liquides dont on vient de parler, sera choisi en commun par les autorités sanitaires et les autorités de la station. Le choix doit tenir compte des données hydrologiques et stratigraphiques.

3 - Le déversement des effluents liquides (de niveau radio-actif moyen) destinés aux bassins d'épandage, est soumis aux limitations suivantes :

- La quantité de Plutonium rejeté ne doit pas dépasser 0,5 c/an/station.

- La quantité de Strontium 90 ne doit pas excéder 0,7 c/an/station : ce total doit être diminué de la quantité qui est apportée par les courants d'eau.

- Les émetteurs β dont la période est supérieure à 15 jours - le Strontium et le Tritium exceptés - doivent atteindre au plus 40 c/mois/station.

- Le pH des effluents destinés à passer sur les bassins d'épandage doit se maintenir entre 6 et 9.

- Le rejet de produits chimiques (déchets chimiques) est interdit.

- Mêmes recommandations que précédemment en ce qui concerne le choix du lieu de rejet.

4 - La quantité totale d'Iode rejetée par toutes les cheminées d'évacuation d'une station ne doit pas dépasser 50 curies par mois.

5 - Le déversement des effluents liquides (provenant des opérations de séparation des isotopes) destinés aux bassins d'épandage est soumis aux limitations suivantes :

- La quantité d'émetteurs α ne doit pas dépasser 0,3 c/mois/station.

- La quantité de Strontium 90 ne doit pas dépasser 0,1 c/mois/station.

- La quantité totale d'émetteurs β non volatils ne doit pas dépasser 8 c/mois/station.

- Le pH de ces déchets doit être compris entre 3 et 10.

- La quantité de sels que contiennent ces déchets doit être mesurée dans ces bassins mêmes et ne doit pas dépasser 1 % du volume des déchets.

- Mêmes recommandations que précédemment en ce qui concerne le choix du lieu de rejet.

Nous prendrons un exemple concret qui nous montrera comment est engagée la lutte contre la pollution de l'environnement aux environs des sites : Oak Ridge nous paraît indiqué pour les raisons suivantes :

- Le refroidisseur utilisé est l'air : les problèmes concernant la pollution atmosphérique y ont donc autant d'importance que ceux de la pollution des eaux et du sol.

- C'est un centre de recherches : les contrôles y sont effectués dans un esprit d'amélioration et avec esprit critique.

- La proximité d'une agglomération comme New-York renforce la valeur de l'exemple, puisqu'elle pose de façon concrète le problème des rapports entre la sécurité des populations et l'exploitation de l'énergie nucléaire.

Nous synthétiserons le plus possible les éléments assez complexes de cette protection et examinerons successivement :

- Le contrôle de la Contamination de l'air,

- Le contrôle de la Pollution de l'eau,

- Les résultats obtenus.

I - CONTROLE DE LA CONTAMINATION DE L'AIR A OAK-RIDGE

Ce contrôle est assuré par trois systèmes d'échantillonnages.

1 - Le contrôle local :

Comprend 10 stations de contrôle, destinées à :

- déterminer le taux de la contamination,
- maintenir l'efficacité de l'épuration de l'air,
- découvrir les processus de contamination particuliers ou nouveaux,
- prendre les mesures nécessaires pour faire face à toute libération accidentelle importante de matières radio-actives.

2 - Le contrôle périphérique à courte distance :

Comprend 7 stations concentriques situées à des distances de 3 à 13 kilomètres du centre nucléaire. Elles effectuent les échantillonnages nécessaires au contrôle habituel de la pollution et à chaque nouvelle expérience, évaluent les modifications de celle-ci.

3 - Le contrôle périphérique éloigné :

Comprend 8 stations concentriques situées à des distances de 18 à 180 kilomètres du centre nucléaire. Elles ont pour rôle :

- de déterminer le degré de contamination de l'air, en coordonnant leurs recherches avec les stations locales,
- de déterminer les processus de dispersion soit en temps normal, soit en cas d'accident important.

Les trois sortes d'échantillons recueillis :

a - Techniques

- L'air passe à travers des filtres qui recueillent les poussières.

- les poussières des retombées sont recueillies sur des collecteurs de papier gommeux ; ces collecteurs sont placés à la surface du sol.

- l'eau de pluie est recueillie de façon à ce qu'elle soit dissociée des autres échantillons : elle servira à déterminer les retombées supplémentaires.

b - Interprétations des informations reçues

Chaque type d'échantillon donne des informations différentes et complémentaires sur la pollution de l'atmosphère :

- Les échantillons des filtres ne contiennent que les particules qui pourraient être inhalées : en effet, les particules lourdes (celles qui ne franchiraient pas la barrière nasale) ne s'élèvent pas dans l'air, on ne peut en trouver dans ces filtres.

- Les collecteurs en papier, au contraire, recueillent à la surface du sol, toutes les particules et donnent un tableau complet des retombées.

- Les échantillons d'eau de pluie contiennent à la fois les retombées de l'air et les particules entraînées par les chutes de pluie : elles donnent des renseignements sur les fractions solubles et insolubles de la contamination radio-active.

c - Utilisation de ces contrôles

- Dans les stations locales, un compteur Geiger enregistre automatiquement les résultats sur un graphique et les données recueillies sont transmises aux stations voisines et également enregistrées automatiquement. L'ensemble des résultats est à tout moment intégré par un système d'alarme qui se déclenche dès que les chiffres dépassent un niveau déterminé.

Dans ces cas, on prend des mesures immédiates :

- arrêt de la fission,
- recherche de la source de contamination excessive,
- correction du système d'épuration des gaz.

II - CONTROLE DE LA POLLUTION DE L'EAU A OAK-RIDGE

Le centre de recherches d'Oak Ridge déverse de grandes quantités d'effluents liquides faiblement radio-actifs dans deux fleuves :

- La Tennessee River par la White Oak Creek,
- La Clinch River.

Les contrôles sont assurés à l'aide d'échantillons recueillis :

- A la sortie du Laboratoire (c'est à dire de l'Installation elle-même).
- Aux points où la voie d'eau devient publique,
- Au centre même des agglomérations les plus proches situées en aval de la station d'Oak-Ridge, c'est à dire à Kensington et à Tennessee.

Au moment de quitter l'installation, les effluents sont dilués, de telle sorte que, compte tenu du débit de la Clinch, les normes soient respectées (C.M.P. et normes de rejet des effluents). Les concentrations moyennes effectives trouvées dans la Clinch peuvent faire modifier la dilution de départ qui a été déterminée par le calcul.

Le tableau de la pollution radio-active des eaux à Oak-Ridge montrent la décroissance des quantités de $\mu\text{c}/\text{cm}^3$ au fur et à mesure que l'on a affaire à un débit plus important : la concentration des éléments radio-actifs dans la Clinch est sensiblement égale à la concentration de la White Oak-Creek que multiplie le rapport $\frac{\text{débit White Oak-Creek}}{\text{débit Clinch River}}$ au point de déversement des déchets. Ceci suppose un mélange uniforme des deux courants.

Les échantillons recueillis en divers points du trajet effectué par les effluents sont hebdomadaires ou mensuels. Les échantillons émetteurs β et α de courtes périodes sont hebdomadaires. Les émetteurs α de longues périodes et certains émetteurs β sont échantillonnés mensuellement. Les émetteurs β sont toujours analysés d'une façon très détaillée. La fraction de l'activité β d'un échantillon est déterminée après séparation des radio-éléments à longue période.

Les analyses mensuelles ne sont pas mentionnées dans ce tableau, ainsi que celles qui se rapportent à l'activité γ des sédiments.

Les échantillons prélevés dans les sédiments permettent en effet de mesurer l'activité γ des isotopes à longue période ; on établit par le calcul l'activité qui en résulte dans un mile (1.609 mètres) de chacune des rivières Clinch et Tennessee.

De temps à autre, un poisson est pêché et on procède à une série complète de dosages : les concentrations observées n'ont jamais été notables. Ces poissons sont consommés par les agglomérations voisines.

Utilisation de ces informations

- Elles permettent de montrer l'étendue de la dispersion des produits radio-actifs, leur concentration dans les sédiments.

- Des résultats globaux, dépendent les prévisions d'extension.

- Enfin elles objectivent l'efficacité de la protection ; elles peuvent amener à corriger certains points de l'aménagement des déchets.

En conclusion, nous voyons que :

- En ce qui concerne la contamination de l'Atmosphère, les C.M. observées étaient égales à :

- . 4 % de la C.M.P. pour l'exposition professionnelle,
- . 4 % de la C.M.P. pour l'exposition au voisinage du site,
- . de 1,6 à 2 % pour les populations habitant la zone surveillée.

- En ce qui concerne la pollution de l'eau, la radio-activité dans la Clinch était en 1959 de $3,1 \times 10^{-7} \mu\text{c}/\text{cm}^3$, c'est à dire 25,8 % de la C.M.P. pour l'eau au voisinage d'une zone contrôlée.

Utilisation de la Surveillance Aérienne

Cette surveillance a été préconisée à Oak-Ridge. On peut utiliser des appareils munis de détecteurs à scintillation qui effectuent des vols au-dessus du site et dans la zone aérienne qui lui est rattachée.

Le but de ces vols est triple :

- 1 - Fournir un moyen de mettre au point l'instrumentation appropriée pour la surveillance aérienne.
- 2 - Déterminer le profil des radiations du milieu aérien au voisinage d'un site et déterminer l'orientation et l'influence des vents.
- 3 - Favoriser le progrès dans les méthodes de surveillance.

Notion de "Fardeau corporel" :

A Hanford, outre les contrôles de l'eau et de l'air, on procède au contrôle régulier de l'alimentation. Compte tenu des habitudes alimentaires locales et des données de la physiologie de l'alimentation, on détermine le taux de radio-activité apportée aux habitants par la consommation alimentaire : c'est le fardeau corporel d'une personne dans l'environnement. Il n'est pas précisé si ce "fardeau corporel" tient compte ou non des autres sources de contamination.

LABORATOIRE NATIONAL D'OAK-RIDGE

CONCENTRATION DES PARTICULES mesurée par des systèmes de contrôle continu

Nombre de particules par 1000 pieds cubes (a)

<u>Année</u>	Zone locale		Zone périphérique		Zone éloignée	
	<u>Max.</u>	<u>Moy.</u>	<u>Max.</u>	<u>Moy.</u>	<u>Max.</u>	<u>Moy.</u>
1949	5,4	0,2				
1950	17,0	0,6				
1951	22,0	0,6				
1952	219,1	3,4				
1953	45,5	2,1				
1954	23,4	1,0			3,3	0,4
1955	13,0	1,4			29,2	1,0
1956	26,6	2,1	8,4	0,7	6,5	0,8
1957	54,9	4,2	16,3	2,0	15,8	1,9
1958	16,9	1,8	5,2	1,5	5,2	1,7
1959	169,4	3,2	10,3	1,1	8,0	1,4

(a) 1 pied cube = 28 cm³

LABORATOIRE NATIONAL D'OAK RIDGE

Valours calculées de la CONTAMINATION RADIOACTIVE DECHARGÉE DANS L'EAU

Année	Bassin-dépôt Curies β déchargées par semaine		White Oak Creek Curies β déchargées par semaine		Concent. moy. prob. ClinchR. Un. de 10-7 μ c /cc par semaine		Concent. Transuran. Bassin-dép. Un. de 10-7 μ c/cc par semaine		Concent. Transuran. White Oak Creek Unités de 10-9 μ c/cc par semaine	
	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.	Moy.	Max.
1948	17,3	38,1	9,5	44,3	1,2	8,1				
1949	19,7	5,1	13,8	65,5	2,2	10,4				
1950	3,3	21,1	3,7	16,8	0,5	1,7	1,1	10,0	3,4	12,8
1951	3,3	20,0	2,0	6,8	0,3	1,7	1,1	6,3	4,7	42,1
1952	7,5	35,6	4,1	16,9	0,6	2,5	1,5	10,1	4,2	19,0
1953	5,6	34,8	5,8	27,5	0,9	6,3	1,5	19,7	8,5	112,4
1954	4,5	41,8	7,4	31,0	1,7	9,4	2,0	22,5	6,9	37,0
1955	4,1	16,6	8,4	53,6	1,3	12,7	2,5	36,1	18,6	173,3
1956	4,9	23,3	11,2	66,4	1,5	9,3	1,9	12,6	27,8	151,2
1957	3,6	13,3	7,6	22,4	0,9	3,0	1,0	3,7	12,2	35,5
1958	1,8	4,4	10,5	80,0	1,4	8,9	2,5	1,8	16,6	34,2
1959	3,5	60,5	18,0	161,6	3,1	36,4	8,2	234,9	90,5	1694,5

LABORATOIRE NATIONAL D'OAK RIDGE

RADIO-ACTIVITE DE L'AIR mesurée par des systèmes de contrôle continu

Unités de 10^{-13} $\mu\text{c/cc}$

<u>Année</u>	Zone locale		Zone périphérique		Zone éloignée	
	<u>Max.</u>	<u>Moy.</u>	<u>Max.</u>	<u>Moy.</u>	<u>Max.</u>	<u>Moy.</u>
1949	2100,0	210,0				
1950	2040,0	180,0				
1951	1050,0	170,0				
1952	782,3	29,0				
1953	4407,3	46,4				
1954	203,183,5	478,4				
1955	2968,6	49,4				
1956	804,7	27,9	29,8	7,0	43,1	10,2
1957	5607,0	82,3	229,7	14,8	47,3	9,0
1958	123,0	25,2	35,5	14,6	36,4	15,2
1959	678,0	38,3	81,3	15,7	100,5	20,3

ESTIMATION
DU
FARDEAU SOMATIQUE
ET DU
FARDEAU GENETIQUE
DES
POPULATIONS

RAPPEL DE QUELQUES NOTIONS DE GENETIQUE

LA PHENOGENETIQUE OU GENETIQUE PHYSIOLOGIQUE

"tend à comprendre comment un caractère se réalise à partir d'un gène" (R. Turpin).

"On tend à l'heure actuelle à considérer le gène comme une molécule protidique d'action enzymatique spécifique et douée d'auto-reproduction" (R. Turpin).

- Le support matériel des gènes est constitué par les molécules d'ADN des chromosomes.

- Un chromosome est constitué par une file de Cistrons (segments de chromosomes plus ou moins indépendants les uns des autres et doués d'une unité de fonctions). Le siège de chaque cistron est un site.

(Classiquement on considèrerait que le génotype était formé d'un cha-
pelet de gènes, comportant des loci (gènes) et des interloci (pas d'activité
génétique) : au niveau de chaque locus, les gènes interchangeable consti-
tuent des allèles).

- Chaque cistron agit par l'intermédiaire d'enzymes, eux-mêmes fa-
vorisés ou non par des enzymes cytoplasmiques qui sont placés sous la dépen-
dance d'autres gènes nucléaires ou cytoplasmiques.

- Chaque gène induit une différenciation cellulaire (phène) dont la
réalisation est modifiée par la présence des autres gènes et par l'influence
du milieu.

- Un même gène ne correspond pas à un phène déterminé ; plusieurs
gènes peuvent contribuer à la réalisation d'un phène et chaque phène a une
influence sur la réalisation de plusieurs phènes différents. (R. Buchet)

LA NOTION DE MUTATION

- On peut définir la mutation comme le changement brusque d'un caractère, d'emblée transmissible et définitivement stable.

- La mutation - tout comme la "reproduction conforme" - se retrouve dans tous les organismes vivants, mais chez l'homme ces phénomènes sont d'une grande complexité, du fait :

- . de la différenciation cellulaire,
- . de la diploïdie du patrimoine génétique,
- . de la sexualité.

- On divise les mutations en trois grands groupes :

- . les mutations chromosomiques, ou visibles
- . les mutations du génome (type : aberrations chromosomiques)
- . les mutations géniques ou ponctuelles ou invisibles.

Seules les mutations géniques seront envisagées ici. Ces mutations ne modifient pas la structure visible : elles se produisent à l'échelle moléculaire et ne comportent qu'une seule étape. Sa mise en évidence ne pourra se faire que par " découverte " de nouvelles propriétés géniques. Ces mutations ont quatre propriétés : elles sont fortuites, stables, fréquentes et ont une valeur sélective.

Nous insisterons sur cette dernière propriété : comme les gènes nombreux de la population humaine ont été sélectionnés au cours des millénaires, il est très probable qu'un changement non dirigé se trouve être défavorable à l'individu. Ce qui explique que l'immense majorité des mutations observées soient défavorables et très souvent incompatibles avec la vie.

Ce qui a conduit certains auteurs à subdiviser les mutations géniques ou invisibles (les chromosomiques étant caractérisées par une modification du phénotype) en mutations léthales (viabilité nulle), subléthales (1 à 10 % de viabilité) et défavorables. Pour une mutation visible, il y aurait 5 mutations léthales et 20 subléthales ou défavorables (Muller).

CAUSES DES MUTATIONS

Nous diviserons ces causes en trois catégories :

- = les causes naturelles : l'agitation thermique des molécules, les processus chimiques intra-cellulaires.
- = les causes provoquées : les agents chimiques (l'ypérite, les époxydes, les peroxydes, les substances cancérigènes),
 - : les agents spécifiques : provoquent des mutations dirigées (ADN chez les bactéries, antisérums spécifiques chez Neurospora, carence en thymine chez Escherichia Coli).
- = les radiations ionisantes (naturelles ou provoquées) :

- La Radio-activité naturelle produit environ 20 % des mutations spontanées.
- La Radio-activité créée par l'homme.

Nous donnons deux tableaux qui permettent de se représenter la distribution des doses gonadales émanant de ces deux catégories de sources. La radio-activité naturelle fournit environ 3 rems accumulés en 30 ans, ce qui représente le 1/4 de l'irradiation à laquelle nous sommes exposés.

TABLEAU I - RADIOACTIVITE NATURELLE

Estimation des doses atteignant les gonades (in 1)

Origine des radiations	Doses moyennes (en roentgens) atteignant les gonades par année
Radiations externes :	
Rayons cosmiques (au niveau de la mer)	0,028
Rayons gamma venant du sol	0,043
Radon atmosphérique	0,001
Radiations internes :	
Potassium 40	0,020
Carbone 14	0,001
Radon et produits de désintégration	0,002
Total	0,095

TABLEAU II - Estimation des doses de rayonnement atteignant les gonades exprimées en pourcentage de radio-activité naturelle (in 1).

Source de rayonnement	Pourcentage
Radioactivité naturelle	100
Diagnostic radiologique	au moins 22
Radiothérapie	?
Radioscopie dans les magasins de chaussures	0-1
Cadrans lumineux des montres et des réveils	1
Appareils de télévision	beaucoup moins que 1
Vol à haute altitude	insignifiant
Risques professionnels :	
- Radiologie et industrie	au moins 1-6
- Energie atomique	0-1
Explosions atomiques	moins que 1

(1) In "The biological effects of atomic radiation". Natural Academy of Sciences. National Research Council - 1956, Washington D.C.

LE NOYAU

—

Le noyau est une formation constante de toutes les cellules. Seules, les cellules en voie de disparition ou quelques cellules très spécialisées en sont dépourvues : hématies, cellules cornées de l'épiderme, fibres du cristallin. Situé le plus souvent au centre de la cellule, il intervient dans toutes les fonctions cellulaires.

= DU POINT DE VUE MORPHOLOGIQUE, on distingue :

1°) - La Membrane Nucléaire : Ce n'est pas une simple surface de séparation entre le cytoplasme et le noyau, mais une véritable formation différenciée qui se décompose en :

- une paroi interne qui fait partie du noyau,
- une paroi externe fine de nature cytoplasmique.

Ces deux parois accolées l'une à l'autre forment une sorte de "fascia cribriformis", réalisant soit une séparation munie de pores fonctionnels de 400 - 500 m μ de diamètre ou de véritables trous qui font communiquer cytoplasme et matière nucléaire, soit une paroi étanche : une mince pellicule ou des bouchons de substance dense obturant les orifices précédemment décrits.

2°) - Le Suc Nucléaire : colloïde complexe, à la fois gel et sol, de pH et de rH instables et pouvant également modifier sa viscosité, sa polarité et son élasticité.

3°) - Le Nucléole : formation intra-nucléaire, arrondie, qui présente :

- une partie centrale acidophile,
- une partie externe basophile et sans solution de continuité avec

4°) - La Chromatine : Cette substance très basophile, présente dans tous les noyaux, semble être le support des caractères héréditaires.

= En dehors de la mitose, la chromatine offre l'aspect d'un réticulum de fins filaments, le Chromonéma, avec çà et là quelques condensations ou granulations de chromatine.

= Au cours de la division cellulaire, ce réticulum se condense et se remanie : la chromatine nous apparaît alors sous forme de bâtonnets visibles au microscope : les chromosomes.

On sait que le nombre diploïde de chromosomes humains, dont l'ensemble constitue le génotype ou le caryotype de l'individu, varie selon le sexe (1).

En 1924, Painter, à l'aide de quatre techniques différentes, avait fixé ce nombre à 48 (2).

En 1956, J.H. Tjio et A. Levan ont établi, qu'en dehors des cas "d'aberration chromosomique" (3), le génotype humain comprend 46 chromosomes.

(1) Nous n'abordons ici qu'incidemment les problèmes de différenciation et de définition du sexe ; nous ne croyons pas commettre de pétition de principe en utilisant ce mot qui, pour nous, départage collectivement les hommes et les femmes". (Littre)

(2) Dans une communication antérieure, Painter hésitait entre 48 et 46. (C.E. Ford et J.L. Hamerton : The chromosomes of man, "Nature" 1956 178-1020).

(3) Mongolisme (47 chr. dont 45 autosomes), Syndromes de Turner (44 A + X) et de Klinefelter (44 A + XXY), Triplo-X ou Superfemale (44 A + XXX), "Mosaïques", etc.

Ces 46 chromosomes comprennent 44 chromosomes somatiques ou autosomes et 2 chromosomes sexuels ou gonosomes ou hétérochromosomes (1).

- Les formules diploïde et après méiose, de la femme s'écrivent respectivement :

44 A + XX

ovule : 22 A + X

- Celles de l'homme :

44 A + XY

spermatozoïde : 22 A + X ou 22 A + Y.

On caractérise actuellement les chromosomes d'après leur taille, la position du centromère et la présence d'un satellite. L'idiogramme chromosomique établi sur ces données comporte une répartition en huit groupes, séparés par des lignes verticales. En outre chaque couple de chromosomes à l'intérieur de ces groupes est numéroté - de 1 à 22 -, les chromosomes sexuels X et Y conservant leur désignation littérale (Commission Internationale de Denver (U.S.A.) - Avril 1960).

Au moment le plus favorable à l'observation, c'est-à-dire à la métaphase :

- Le chromosome X se présente comme un chromosome moyen (longueur = 5,8 % du génome haploïde) avec un centromère médian. On le classe parmi les éléments de tête du groupe 6-12 de Denver.

- Le chromosome Y est au contraire très petit (longueur = 1-2 % de la longueur du génome) et son centromère est terminal.

(1) Cette dénomination vient du fait que les chromosomes sexuels possèdent une région dite hétérochromatique qui conserve en dehors de la mitose certaines propriétés rencontrées au cours de la mitose et notamment sa coloration basophile. Nous verrons que chez la femme ce fait coïncide avec l'existence de ce qu'on appelle la chromatine sexuelle.

La chromatine sexuelle de Barr (M.L Barr, K.L Moore, M.A Graham-1953)

Il s'agit d'un corpuscule chromatinien situé contre la surface interne de la membrane nucléaire de n'importe quelle cellule somatique au repos de la femme. Ce corpuscule est constamment absent chez l'homme.

On s'explique ainsi la formation de cette chromatine sexuelle : chez la femme, les portions hétérochromatiques des deux X s'accoleraient (après la mitose) pour constituer une masse de chromatine facile à identifier, alors que chez l'homme la portion hétérochromatique de Y serait de plus petite dimension et peut-être incapable de s'accoler à la portion hétérochromosomique de X, donc invisible.

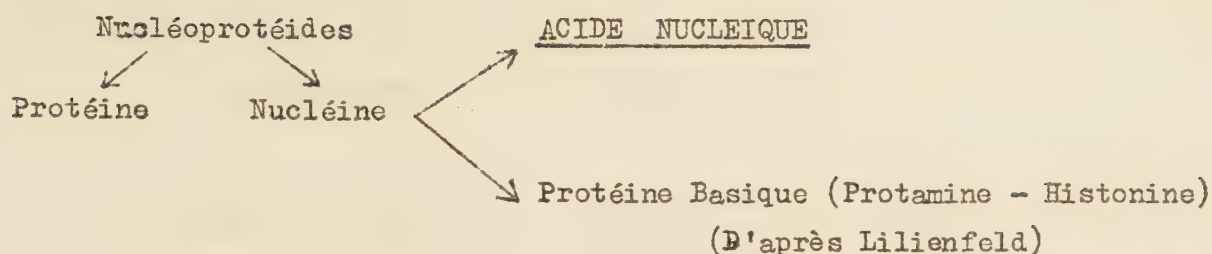
En pratique, cette chromatine sexuelle est mise en évidence sur les frottis de muqueuse jugale, par biopsie de la peau ou au niveau des polynucléaires du sang (1). Elle conduit à la détermination du "sexe chromatinien" qui peut être confirmé par la détermination du "sexe chromosomique", lequel s'établit par culture de tissu et recherche des chromosomes sexuels eux-mêmes, au moment de la métaphase.

= DU POINT DE VUE BIOCHIMIQUE,

Le noyau présente une composition stable pour une catégorie cellulaire donnée. Il est riche en Acide Nucléique (60 % du poids des spermatozoïdes de poisson) et surtout en Acide Désoxyribonucléique (A.D.N.).

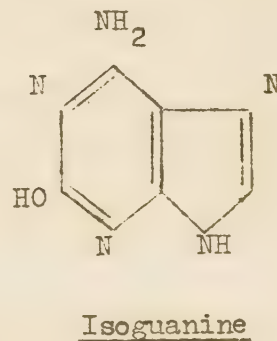
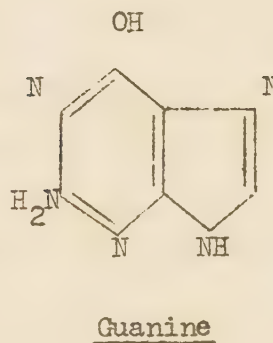
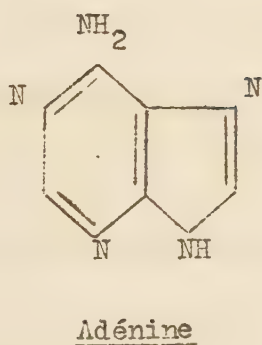
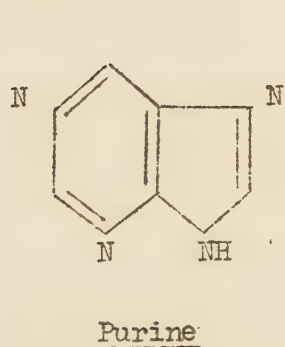
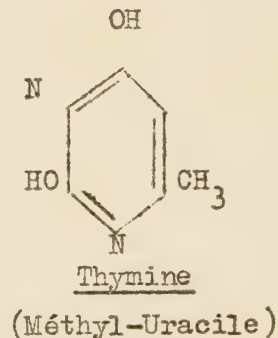
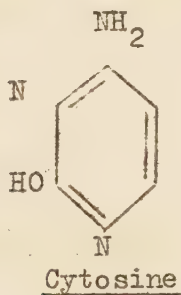
Les acides nucléiques forment le groupement prosthétique des nucléoprotéides :

(1) Davidson et Smith, en 1954, avaient de leur côté révélé l'existence d'une formation chromosomique supplémentaire "en baguette de tambour" dans les polynucléaires de la femme, qui leur permettait d'affirmer le sexe féminin.

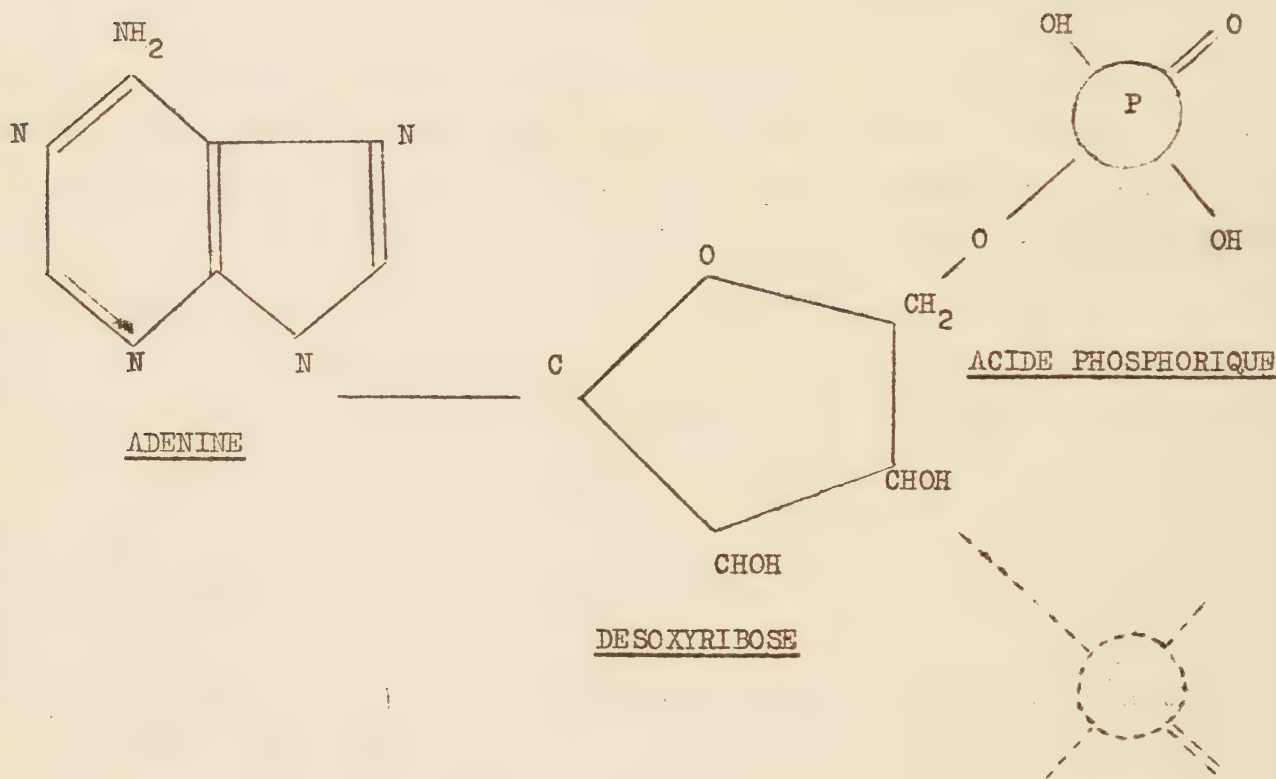


Les chromosomes sont composés de Nucléines (A.D.N. + Protéines basiques). Les études menées sur les microorganismes ont montré que le rôle essentiel est dévolu à l'Acide Désoxyribonucléique (A.D.N.).

Les Acides Nucléiques sont constitués de longues chaînes polymérisées dont l'élément fondamental est un Nucléotide : à une molécule d'Aldopentose est fixé d'une part une molécule d'Acide Phosphorique, d'autre part une base aminée hétérocyclique, soit une Purine, soit une Pyrimidine.



- Dans le cas du Nucléotide de l'Acide Désoxyribonucléique,
- le pentose est le DESOXYRIBOSE :
 - la base est soit une purine : ADENINE ou GUANINE en général,
soit une pyrimidine : CYTOSINE, THYMINE (Méthyl-Uracile)
ou la 5-Hydroxy-Méthyl-Cytosine.



Les Acides Nucléiques sont donc des Polynucléotides et contiennent le plus souvent quatre sortes de Bases Aminées.

Modèle de Watson et Crick pour la structure de l'A.D.N. :

Selon Watson et Crick, la disposition des nucléotides de la molécule d'A.D.N. correspond à deux chaînes hélicoïdales enroulées dans le même sens autour d'un axe imaginaire et reliées entre elles par des ponts basiques ou si l'on préfère à l'image d'une échelle qui s'enroulerait autour d'un axe perpendiculaire à ses barreaux.

De cette disposition de la molécule d'Acide Désoxyribonucléique, découlent certaines conséquences importantes :

1) = Les bases vont par paires : les liaisons chimiques ne peuvent s'effectuer qu'entre Adénine - Thymine ou entre Guanine - Cytosine, par une liaison H qui se situe dans l'axe de la molécule.

2) = On a comparé cette structure à une fermeture-éclair et chaque moitié peut se reconstituer à partir de l'autre. Cela expliquerait :

- La grande résistance de la molécule : pour que celle-ci soit lésée il faut que les deux chaînes soient lésées à la fois à des niveaux voisins.

- Le rôle de l'A.D.N. dans l'autoduplication des chromosomes, donc la transmission des caractères héréditaires.

3) = L'information génétique dépendrait de la séquence de ces paires de bases :

- Il n'existe, pour les 4 bases existantes que 4 possibilités d'appariement.

- La combinaison de 20 Acides Aminés réalise l'infinie variété des protéines spécifiques de chaque espèce.

- Si l'A.D.N. est le support de l'information génétique et que la séquence de ses bases est une des clés de ce code d'information, on conçoit que le matériel génétique dispose d'une "écriture", car il contient des milliards de bases, appariées comme on l'a vu.

La synthèse des protéines spécifiques commandée par cette information génétique s'effectue dans des conditions que nous comprenons mal. On peut néanmoins, avec Bréchet et Breitman, imaginer que si les quatre liaisons A-T, T-A, C-G, G-C, sont les quatre lettres d'un code d'information, certaines

de colles-ci pourraient être transmises par la molécule d'A.D.N. de la cellule-mère à la cellule-fille comme un programme, "comparable aux programmes qu'on glisse dans les cerveaux électroniques et qui sont réglés avec deux lettres seulement".

Chaque molécule d'A.D.N. constituerait ainsi un message chiffré de la cellule-mère à la cellule-fille, contenant toute une série d'ordres à effectuer.

4) = Lorsque la molécule d'A.D.N. passe de l'état déroulé à l'état enroulé :

- la largeur de la molécule passe de $30 \text{ \AA}$ à $3 \text{ \AA}$ environ (selon le degré d'enroulement) ;

- la longueur de $14 \text{ à } 6 \mu$.

Il existe donc une place plus ou moins importante pour d'autres molécules, H_2O_2 et O_2 par exemple.

Les Acides Nucléiques peuvent donc être plus ou moins oxydés et plus ou moins hydratés selon leur degré d'enroulement et voir ainsi leur radiosensibilité modifiée.

RAPPEL DES PRINCIPAUX PHENOMENES HEREDITAIRES

--

CARACTERES NORMAUX

Les différents caractères héréditaires normaux de l'homme se répartissent en deux catégories :

- les caractères monomériques à transmission mendélienne simple,
- les caractères à déterminisme génétique très probable, mais non déterminé (hérédité polymérique). (R. Turpin)

Inventaire des caractères à hérédité mendélienne simple (selon Turpin) :

- 1 - Groupes sanguins.
- 2 - Caractère sécréteur (sécrétion de A,B,O, dans la salive, le liquide gastrique, etc.)
- 3 - Certains caractères quantitatifs : types nucléaires (formule d'Arneth par ex.)
 - : longévité,
 - : gémellité.
- 4 - Certaines particularités morphologiques :
 - Taille et développement du rachis,
 - Crâne et configuration dentaire,
 - Couleur des yeux, de la peau, des cheveux,
 - Empreinte digitale,
 - Forme des cheveux.

CARACTERES PATHOLOGIQUES

A - MALADIES DOMINANTES

1 - Affections oculaires : Cécité nocturne, Cataractes congénitales, Glaucome, Ptosis, Opacité cornéenne congénitale.

2 - Affections du Squelette : Brachydactylie, Symphalangie, Main "en pince de homard" avec dysostose cléido-crânienne.

3 - Affections de la peau et des phanères : Tylosis, Dystrophie unguéale, Sclérose tubéreuse de Bourneville, Neurogliomatose, Hommes-pies, Téliangiectasies multiples, Epidermolyse bulleuse héréditaire, Glossite exfoliatrice et langue plicaturée.

4 - Affections du Système Nerveux : Chorée de Huntington, Tremblement héréditaire, Amyotrophie Charcot-Marie.

B - MALADIES RECESSIVES

Le malade sera nécessairement un Homozygote.

1 - Affections du Système Nerveux : Idiotie amaurotique, Surdité-mutité.

2 - Affections oculaires : Rétinite pigmentaire (parfois dominante (D) ou liée au sexe (S)).

3 - Affections cutanées : Xeroderma pigmentosum (partiellement liée à S) Hyperkératose congénitale généralisée, Maladie de Meleda (R ou D).

C - HYBRIDITE EN MOSAIQUES

Particularités relatives aux cheveux, à la pigmentation, au squelette, aux caractères sexuels.

D - MALADIES LIEES AU SEXE

Il s'agit surtout de maladies liées au chromosome X ; les caractères liés au chromosome Y sont exceptionnels.

= X :

1 - Affections oculaires : Troubles de la perception des couleurs (achromatopsie, dyschromatopsie, achromatopsie totale), Névrite optique rétrobulbaire, Nystagmus essentiel hérédo-familial, Nystagmus myoclonie de Lenoble et Aubineau, Malagocornée.

2 - Autres affections : Affections cutanées et des dents, Hémophilie.

= Y :

Une maladie solidaire du chromosome Y n'atteint que les hommes et n'est transmise que par eux : ce sont des maladies "holandriques".

- Noevus Keratolicus papillomatosus (variété d'Ichtiase),
- Palmure unissant IIème et IIIème orteils.
- Keratoma dissipatum hereditarium (variété de Kératose).

E - MALADIES METABOLIQUES

= Troubles du Métabolisme des Protides :

- Idiotie Phénylpyruvique ou Phénylcétonurie : R (oligophrénie + excrétion urinaire d'Acide Phénylpyruvique).

- Albinisme généralisé : R (absence de pigmentation de la peau, des phanères, de l'iris).

- Tyrosinose (élimination d'A. Parahydroxyphénylpiruvique non oxydé dans les urines).

- Alcaptonurie : R (Coloration noire des urines par l'A. Homogentisique + pigmentation des cartilages).

- Cystinurie (excrétion urinaire de cystine avec lithiase cystinique possible).

- Cystinose : R (diabète glyco-phospho-aminé. Le syndrome de Toni-Fanconi-Debré en est une forme clinique).

- L'Amyloïdose (quelques cas héréditaires)

- Goutte (T. du métabolisme des purines, quelques cas influencés par l'hérédité).

- Phosphaturie et Oxalurie.

= Troubles du Métabolisme des Hydrates de Carbone :

- Diabète sucré (transmission autosomique incomplètement dominante)

- Diabète rénal : D

- Diabète insipide rénal : R lié au S.

- Diabète hypophysaire : D

- Galactosurie : R

- Fructosurie et Pentosurie : R

- Maladie glycogénique du Foie : R

- Hypoglycémie idiopathique spontanée : R.

= Troubles du Métabolisme des Lipides :

- Maladie de Gaucher : D (dépôt tissulaire de Kérasine).

- Maladie de Niemann-Pick : R incomplète (dépôt de sphingomyéline)

- Idiotie Amaurotique familiale ou Maladie de Tay-Sachs (accumulation de lipoides dans les cellules nerveuses).

Ces trois maladies sont parentes.

- Xanthose tubéreuse cutanée avec hypercholestérolémie,

- Maladie de Hans-Schüller-Christian sans hypercholestérolémie,

- Xanthomatose disséminée.

- Lipoidose, Hyperlipémie essentielle.

- Gargoylisme = Dysostosis multiplex = Lipochondrodystrophie = M. de Hurler : R.

= Troubles du Métabolisme Pigmentaire :

Porphyrimurie (D), Méthémoglobinurie (D ou R), Hémochromatose ou Diabète bronzé (R), Maladie de Wilson ou Dégénérescence Hépatolenticulaire (R, T. du métabolisme du Cuivre).

= Prédisposition Héréditaire aux agressions morbides :

1 - Aux infections en général :

- Vulnérabilité à la Scarlatine et à la Diphtérie : R.
- Sensibilité à l'égard de la Polyomyélite : R avec pénétrance de 70 %.
- Agammaglobulinémie congénitale : R.

2 - A la Tuberculose : R ou polygénique.

3 - Au Cancer :

a - Des maladies héréditaires dégénèrent tôt ou tard :

- Gliome de la Rétine,
- Polypose colique,
- Xeroderma Pigmentosum.

b - L'hérédité chromosomique joue un rôle dans la détermination du siège de la tumeur (voies digestives, seins, utérus).

c - L'hérédité cytoplasmique interviendrait à l'origine du Cancer du sein, des organes génitaux.

4 - Prédisposition aux Accidents allergiques :

L'hérédité semble commander à une prédisposition générale à l'allergie et non à certains types d'allergie.

DEFINITIONS ET DONNEES DE BASE

= Génétique de Population :

C'est l'ensemble des modèles mathématiques qui peuvent être construits pour représenter l'évolution de la structure d'une population classée suivant la distribution de ses gènes mendéliens. (G. Malecot)

C'est la science qui étudie la structure générale des divers types de population et ses variations éventuelles d'une génération à l'autre, sous l'action des facteurs suivants :

1 - La sélection ou la fécondité différentielles (les individus porteurs de certaines combinaisons de gènes se reproduisent moins que l'ensemble des couples).

2 - La consanguinité.

3 - Le choix du conjoint systématique (ainsi les porteurs d'un même caractère se marient entre eux plus souvent que ne le voudrait le hasard).

4 - Les mutations de gènes qui font que la nature de certains gènes et leur position d'équilibre dans la population se trouvent modifiées.

5 - Les migrations.

6 - Les limites de l'effectif de la population (P. L'Héritier).

Les mutations dues à l'action des radiations ionisantes contribueront donc à la modification de la structure de la population : mais il faut remarquer que d'une part les mutations ne sont qu'un des six facteurs qui modifient cette structure et que d'autre part les radiations ionisantes ne sont qu'un des facteurs susceptibles de produire des mutations ; enfin parmi les mutations produites seules les mutations invisibles semblent avoir une importance prévisible assez grande pour que l'on parle de "fardeau génétique" et qu'on en donne une estimation statistique.

Comment obtenir cette estimation statistique, autrement dit quel est le "modèle mathématique" représentatif des modifications évolutives de structure d'une population liées à l'action retardée des radiations ionisantes ?

Ce modèle mathématique nous est fourni par la définition de la fréquence des mutations ; ainsi nous sont posés deux sortes de problèmes : la détection des mutations, l'estimation de leur taux.

1 - La fréquence des mutations est comptée par gène et par génération, c'est à dire la fréquence ou le taux de mutations d'un gène donné est mesuré par le rapport :

$$m = \frac{\text{Nombre de gènes nouveaux apparus dans une génération}}{\text{Nombre de gènes (nouveaux + normaux) transmis à cette génération}}$$

Dans le cas d'une mutation dominante, pour mesurer la fréquence de cette mutation, il suffit de compter, parmi un grand nombre d'enfants, le nombre de sujets atteints nés de parents indemnes :

$$2 m = \frac{\text{tarés nés de parents indemnes}}{\text{population étudiée} - \text{individus nés de parents tarés.}}$$

(On écrit ici $2 m$ parce que les tarés ne portent qu'un seul gène muté et un allèle normal, alors que les individus recensés portent deux gènes normaux).

Exemple : cas de l'Achondroplastie : Mörch a relevé 10 achondroplasties sur 94.075 naissances à Copenhague en 1941 ; de ces 10 achondroplasties 2 étaient issus de parents tarés (même affection), 8 de parents normaux. Ces 8 cas représentaient de nouvelles mutations, dont la fréquence était :

$$2 m = \frac{8}{94.073} = 4,2 \times 10^{-5} \quad (\text{d'après R. Turpin})$$

Deux sortes d'erreurs peuvent être commises :

- la pénétrance de la tare peut être incomplète : certains parents transmettent la tare alors qu'ils sont apparemment indemnes.

- certaines embryopathies non héréditaires réalisent des "phénocopies" de maladies héréditaires.

Enfin il convient de retenir que certains facteurs physiologiques modifient la sensibilité des cellules aux lésions génétiques causées par les radiations : "dans le cadre génétique s'intègrent les notions d'effet direct et indirect" (Buchet). Trois facteurs sont susceptibles de modifier la radio-sensibilité :

- l'effet oxygène ($1'O_2$ doit être présent au moment de l'irradiation. L'effet mutagène serait déterminé par l'action de peroxydes).

- le stade de différenciation cellulaire (mécanisme rapporté à l'effet oxygène par certains).

- l'intensité de l'irradiation : la fréquence des mutations induites par une quantité d'énergie ionisante est proportionnelle à cette quantité d'énergie. Et cette fréquence est d'autant plus grande que la dose identique a été administrée avec un débit plus rapide.

"On peut se demander s'il n'y aurait pas là aussi une intervention de l'effet oxygène" (Buchet). Il n'y a pas de seuil. Les effets des petites doses sont additifs.

2 - Détection des Mutations : (d'après M. Lamy)

a - Critères :

Seules les mutations dominantes et les mutations liées au sexe peuvent être affirmées avec certitude.

1 - Les caractères dominants sont hétérozygotes. Le gène vient de l'un des parents. Donc en moyenne, seront tarés :

- la moitié des descendants,
- la moitié des germains.

On pourra soupçonner la mutation si l'on constate les proportions attendues (tous les termes de la définition seront alors satisfaits).

Cependant la manifestation des gènes peut être modifiée par :

- de nombreux autres facteurs génétiques ou ambiants;
- si l'affection lèse la viabilité (un tel facteur devrait disparaître, mais des mutations nouvelles récurrentes peuvent apparaître).

2 - Les mutations récessives liées au sexe : Dans le cas où les tares sont portées par X. et les mâles tarés (X.Y),

- L'homme taré a des fils indemnes (XY) et des filles conductrices (X.X).

- Ces filles tarées donneront naissance à des garçons sains (XY), des garçons tarés (X.Y), des filles normales (XX) et des conductrices (X.X).

- Pour soupçonner la mutation, il faut que la mère des tarés (1/4) ait un père, des frères, des grands-parents indemnes.

3 - Les tares récessives se manifestent chez des homozygotes qui naissent de parents hétérozygotes (le plus souvent).

- L'un des gènes transmis peut avoir subi une mutation récente,

- Mais le gène peut se transmettre silencieusement pendant des générations.

Il est donc illusoire de vouloir déceler dans une lignée un gène autosomique récessif, sauf cas exceptionnels (Drépanocytose, Thalassémie, car il existe alors un avantage sélectif des Hétérozygotes).

b - Influence de l'âge (hypothèse de Penrose) :

Trois possibilités différentes :

1 - S'il y a seulement erreur de duplication, cela intéresse les spermatozoïdes qui sont issus de la formation d'un très grand nombre de gamètes, plutôt que les ovules : on s'attend à l'augmentation de l'âge paternel.

2 - S'il y a mutation par agents toxiques du métabolisme, il se produira plutôt une altération des ovaires : on s'attend à une augmentation de l'âge maternel.

3 - S'il y a mutation provoquée par la radio-activité naturelle, on s'attend à l'augmentation de l'âge des deux parents.

3 - Estimation du taux des mutations :

1 - Elle n'est possible que dans les cas privilégiés, car elle nécessite que les conditions suivantes soient satisfaites :

- Les phénotypes normaux et mutés doivent être distincts.
- La fréquence dans la population générale ne doit pas être trop faible.
- La parenté doit être certaine.
- Tous les cas observés du caractère étudié doivent pouvoir être rattachés au même gène.

2 - Elle présente de nombreuses causes d'aberration :

- Le progrès des recherches a toujours conduit au démembrement d'entités anciennes (conclusion fondamentale pour Lamy) : ce qui paraissait comme une maladie due à l'action d'un gène, ne représente que des cas cliniquement indistincts et génétiquement dissemblables (Hémophilies A et B ; Hyperplasie congénitale des surrénales).

- Une maladie est tantôt dominante, tantôt récessive (Alcaptonurie, Achondroplasie).

- Une embryopathie peut réaliser une phénocopie (= mutation somatique) tel est le cas du Rétinoblastome.

3 - Deux méthodes de calcul possibles pour le taux des Mutations :

- La méthode directe s'applique aux affections liées à D et S. Elle permet de connaître la fréquence des mutations telle que celle-ci a été définie plus haut.

- La méthode indirecte de J.B.S. Haldane s'applique aux affections liées à R. Si l'on suppose que la fréquence de la maladie considérée est constante, il faut que le taux de mutations nouvelles soit = au taux de dis-

parition du gène mutant sous l'effet de la sélection naturelle :

$$m = (1 - f) q^2$$

m = taux de mutation

f = fertilité relative des homozygotes

q^2 = fréquence de la maladie dans la population.

Critiques :

1 - Il n'est pas sûr que les tares soient en équilibre.

2 - Des génotypes normaux AA et Aa n'ont pas la même valeur sélective.

Dans le cas de la drépanocytose par exemple (taux de mutations élevés) l'avantage sélectif des hétérozygotes est très probable.

LE DANGER GENETIQUE POUR LES POPULATIONS HUMAINES

"Nous pouvons être sûrs que les radiations ionisantes induisent des mutations chez l'homme" (M. Lamy).

Le danger génétique des Radiations ionisantes menace l'espèce : il ne peut être pris en considération à l'échelle individuelle (négligeable) mais doit être évalué pour l'ensemble de la population. "L'effet génétique dans l'espèce humaine demeure essentiellement un phénomène de population" (Buchet). D'où la suggestion de normes gonadales moyennes devant être respectées par la moyenne de la population et non de DMA par individu.

L'appréciation du danger génétique des radiations ionisantes est basée sur la notion de dose de doublement : c'est la dose-moyenne-30 ans qui double le taux des mutations spontanées.

Il existe donc deux manières de comprendre ce problème du danger génétique des radiations ionisantes :

- = Connaître (et donc déterminer) la dose de doublement moyenne.
- = Evaluer les conséquences de ce doublement sur les populations.

DETERMINATION DE LA DOSE DE DOUBLEMENT MOYENNE :

Etant donné l'état de nos connaissances dans le domaine des effets génétiques, nous schématiserons notre exposé sans trop faire apparaître l'incertitude des données sur lesquelles nous nous appuierons. En outre il ne

saurait être question d'avancer des chiffres rigoureux : nous ne ferons qu'exprimer des ordres de grandeurs qui permettront de fixer les idées.

a) - La variabilité génétique :

Le patrimoine héréditaire d'une population est composée :

- d'un groupe commun de gènes (mêmes allèles) ;

- d'un groupe de gènes avec allèles dissemblables : elle est hétéralle-
lique

. Si elle est hétérallelle pour 1 allèle : 3 génotypes possibles

. " " " : 3^n "

Ces 3^n allèles constituent sa variabilité génétique.

b) - L'hérédité pathologique :

Ces 3^n génotypes comprennent des génotypes qui différencient les individus sans dommage et d'autres qui déterminent l'hérédité pathologique.

- Ceci conduit à distinguer dans cette variabilité génétique, des gènes indifférents et des gènes défavorables. Ceux-ci peuvent être en partie induits par des mutations ou par les forces sélectives, (on a ainsi une incertitude qui apparaît).

- La dose de doublement concerne seulement cette catégorie de gènes défavorables induits par mutations.

c) - Détermination de la dose de doublement :

1ère méthode : - On détermine le taux de mutations spontanées : par exemple le taux de mutabilité spontanée des Albinos a été estimé à 10^{-5} par génération et par individu.

- On sait que chez la Drosophile chaque r accroît de 2×10^{-8} le taux des mutations. On peut extrapoler chez les mammifères et admettre que chez l'homme chaque r accroît de 30×10^{-8} le taux de mutation (15 fois plus) : on a évalué la radiosensibilité génique.

La dose de doublement sera : $\frac{10^{-5}}{30 \times 10^{-8}} = 30 \text{ r.}$

2ème méthode : On détermine la fréquence avec laquelle des irradiations données produisent certaines anomalies : on sait par exemple que le taux de masculinité dans la descendance de femmes ayant subi des irradiations du petit bassin (diminution de la récessivité de X) déterminait un facteur léthal de $- 5 \times 10^{-5}$. Le taux des mutations spontanées produit un facteur de léthalité de $- 7 \times 10^{-4}$, en dix ans.

La dose de doublement sera donc
$$\frac{7 \times 10^{-4} \times 3}{6 \times 10^{-5}} = 30 \text{ r.}$$

Cette dose de doublement serait comprise entre 30 et 50 r/30 ans.

AUGMENTATION DE LA FREQUENCE DES TARES EN FONCTION DU DOUBLEMENT DU TAUX DES MUTATIONS :

En ce qui concerne les possibilités d'accroissement du fardeau génétique, il y a lieu de distinguer deux éventualités : la stabilité de l'espèce, c'est-à-dire l'équilibre entre les mutations nouvelles et la valeur sélective des génotypes existants, peut être modifiée :

= soit par une augmentation du taux des mutations (allèle dominant avec hétérozygotie, allèle récessif avec homozygotie, tare liée au sexe),

= soit du fait de la prédominance sélective des homozygotes par rapport aux hétérozygotes (Muller) ou inversement (Dobzhansky, Lerner et Wallace).

Dans le premier cas, il est certain que le fardeau génétique peut être accru par les Radiations Ionisantes ; dans le second cela est assez douteux, en tous cas difficile à mettre en évidence.

L'augmentation des tares en fonction de la dose de doublement a été calculée pour quelques cas ; nous résumons ceux-ci :

- L'achondroplasie (mutations léthales dominantes) passerait de 1 à 1,8 pour 10.000 en une génération et cet équilibre se maintiendrait (Mörch).

- L'Hémophilie (tare récessive liée au sexe) augmenterait de 30 % en une génération et de 90 % en 6 générations (Penrose).

- Le taux de coefficient intellectuel inférieur à 70 qui est actuellement de 2,3 % serait multiplié par un chiffre de 2, ou 2,9 au bout de quelques générations (Mather). Il s'agit d'une déficience à caractère complexe.

- Le taux des déficiences mentales (oligophrénie phénylpyruvique, idiotie amaurotique familiale, microcéphalie héréditaire) qui est de 1 % (25.000 cas en France) augmenterait de 1 % en une génération. (Medical Research Council - Londres 1956) Il s'agit d'une tare récessive qui apparaît seulement en cas d'homozygote.

En fait il est probable que ces dommages génétiques seront compensés par ailleurs par l'accroissement de nos moyens sanitaires et de prophylaxie générale qui atténueront les rigueurs de la sélection naturelle, à moins qu'ils ne la fassent dévier.

LE RISQUE LEUCEMOGENE ET CANCERIGENE DES RADIATIONS IONISANTES

--

Les organes hématopoïétiques (rate, moëlle osseuse, foie, et thymus chez l'enfant) contiennent des lignées cellulaires très radio-sensibles qui subissent la transformation maligne pour des doses relativement faibles. Il semble que la période de latence soit moindre pour les leucémies que pour les sarcomes et les épithéliomas. Pour cette double raison, les récentes statistiques qui ont essayé de calculer l'influence d'une augmentation du taux de la radio-activité générale sur l'endémie cancéreuse, ont pris la leucémie pour principal objet d'études.

Des arguments tirés d'enquêtes diverses et des arguments expérimentaux on ne peut conclure quant au mécanisme d'induction des leucémies. Mais ces arguments ne constituent pas moins des preuves probantes en faveur de l'action aisément leucémogène des R.I.

Sans vouloir entrer dans les détails des différentes hypothèses qui ont été formulées pour expliquer les processus de néoformation sous l'action prolongée de petites doses de rayonnement ionisant, nous voudrions attirer d'emblée l'attention sur la contradiction - qui n'est peut-être que relative - entre le postulat adopté par les commissions internationales pour fixer les normes de protection pour une large couche de population, à savoir le "nonthreshold linear-effect relationship" et certains tenants de l'école française : "puisque les cellules cancéreuses ont acquis de manière durable des propriétés nouvelles, il s'agit bien d'une sorte de mutation, mais il est peu probable qu'elle corresponde comme les mutations usuelles de la génétique, à une modification dans la structure des gènes. Aussi, sans plus ample information, il serait injustifié d'admettre que la produc-

tion de cancers par les radiations est nécessairement un phénomène de cible, donc que la fréquence de l'effet est linéairement proportionnelle à la dose totale reçue par les cellules, sans admettre aucun seuil d'intensité ou de dose". (Ph. Lhéritier).

Si nous avons tenu à souligner cette opposition de "doctrines", c'est qu'il nous semble que les normes draconiennes proposées pour la protection des populations - et dont les conséquences économiques sont considérables - ne se justifieraient plus si les doses n'étaient cumulatives et supposées agir sans seuil au point de vue somatique. Il convient de souligner que l'on a adopté ce postulat (absence de seuil, petites doses = effets toujours cumulatifs) justement parce que les preuves du contraire étaient jugées insuffisantes et que cette décision arbitraire (sur le plan scientifique) correspondait à la détermination qui couvrirait tous les risques.

Au demeurant, n'y a-t-il proportionnalité linéaire qu'entre un rayonnement et son effet sur une cible ? Cette théorie est-elle la seule qui soit conciliable avec une réponse "immédiate" (sans seuil) et la possibilité d'une accumulation des dommages irréversibles (effets cumulatifs) ?

Il semble concevable que l'existence d'un seuil pour l'obtention d'un effet délétère soit la généralité et l'absence de seuil l'exception. Cette "exception" pouvant correspondre soit à une sensibilisation préalable (inhabituelle) aux R.I., soit à une sensibilisation à d'autres agents leucémogènes causée par les R.I. A la conférence de Cannes de Septembre 1957 (I), Peacock a rapporté des faits troublants : dans le cas de certains sarcomes d'oiseaux associés à des virus filtrants, une conséquence caractéristique de l'irradiation locale est l'apparition d'une tumeur secondaire à l'endroit irradié. On a observé ce phénomène chez les oiseaux présentant

(I) Conférence internationale sur les conditions de vie et de travail sur la santé - Cannes 27 - 29. IX - 1957 (Concours Médical 16 - 23. VIII. 58).

quatre formations tumorales différentes. Des tumeurs secondaires peuvent être provoquées par simple cautérisation ou par des réactions inflammatoires (I).

A notre sens, il se pourrait bien que la protection contre les radiations ionisantes ne doive pas seulement envisager la prévention des effets propres des R.I., mais aussi celle qui pourrait découler de leur rôle au cours d'agressions complexes.

Nous exposerons succinctement les données devenues classiques qui démontrent le rôle leucémogène des R.I., données qui nous ont été apportées :

- par diverses enquêtes statistiques,
- par l'expérimentation.

A - LES DONNEES APORTEES PAR LES ENQUETES STATISTIQUES

1 - Enquêtes pratiquées à Hiroshima ou Nagasaki :

Les premiers résultats remontent à 1948. Ils sont difficiles à interpréter, du moins ne nous renseignent pas d'une façon déterminante sur les possibilités d'induction de leucémies par des irradiations à petites doses répétées.

Le taux global des leucémies aurait été de 7 à 8 fois - voire 12 selon certains auteurs - supérieur à celui des populations voisines (Tokio) ou des collectivités venues s'établir à Hiroshima après le bombardement.

(I) Jusqu'ici toutes les expériences en vue de caractériser les effets des R.I. ont été menées sur des animaux "standard". Il nous paraît que des études comparatives effectuées sur des animaux aseptiques (élevés dans des conditions rigoureusement aseptiques) par exemple, pourrait aider à trancher le débat entre les tenants du seuil et leurs opposants On sait par exemple que la dysenterie amibienne ne peut être inoculée à ces animaux, mais que cela devient possible dès qu'on les place dans des conditions normales, l'animal devenant alors porteur de germes.

N. Kusano (1957) relève beaucoup plus de décès parmi les irradiés que dans les groupes témoins : la leucémie en serait une des causes. Actuellement une dizaine de cas nouveaux se produisent chaque année.

Malheureusement il se trouve que la majorité des cas observés, l'ont été chez des personnes exposées près de l'hypocentre où les doses reçues étaient aiguës et très fortes ; et ces leucémies s'accompagnaient d'autres troubles (Wald, 1958). Au delà de 2.000 mètres, 9 cas seulement.

On note que dans la "couronne" où les doses reçues étaient les plus fortes, les sujets jeunes étaient les plus atteints.

On sait que la majorité de ces leucémies étaient des leucococes myéloïdes et que le maximum de fréquence a été observé en 1950 (Moloney et Lange).

2°) - Enquête de Lewis chez les Radiologues :

a) - Chez les Radiologues, Lewis, dans une enquête allant de 1938 à 1952, note :

- 17 cas de leucémies chez des radiologues âgés de 35 à 75 ans (1.850 sujets)

- Un raccourcissement de vie de 5 ans en moyenne. (W.H Court-Brown et R. Doll, dans leur enquête portant sur 1.377 sujets de 1.897 à 1.956, retrouvent ces résultats et n'observent aucune différence appréciable entre ces radiologues et le reste de la population, en ce qui concerne la durée de vie).

- Dullin et Siegelman confirmèrent les résultats de Lewis.

b) - Chez les autres médecins,

- Dans une population prise au hasard : 3,5 % de lésions tumorales.

- Chez les médecins pris en dehors des Radiologues : 8,5 %.

3°) - Enquête de W.H. Court-Brown et Doll (1957) sur des malades

atteints de Spondylarthrite Ankylosante : (1)

Court-Brown et Doll comparent la fréquence de la leucémie chez les malades traités par radiothérapie et ceux qui ne le sont pas :

- 1er lot : pas d'irradiation = caractère exceptionnel de la leucémie
- 2ème lot : irradiation vertébrale à doses qui ne sont pas basses, mais étalées = caractère fréquent de la leucémie.

Selon que l'on considère la dose irradiée sur la colonne ou sur tout le corps, la courbe qui représente les relations entre les doses reçues et le nombre de cas observés est une droite (colonne) ou une ligne curviligne (tout le corps). "Ces résultats peuvent être diversement interprétés, mais les auteurs préfèrent admettre une relation linéaire, comme "hypothèse de travail" (as a working hypothesis).

La dose capable de doubler la probabilité de la leucémie serait de l'ordre de 30 r chez l'adulte.

4°) - Enquête de Miss Alice Stewart (1956) sur les enfants de moins de dix ans morts de leucémies entre 1953 et 1955, en Angleterre et au Pays de Galles. (2)

- Elle observe un accroissement des cas de leucémies chez les enfants nés de mères qui avaient subi des radiographies obstétricales (diagnostic de positions, pelvimétries) : ce taux s'élève à 178 pour 1.500 morts. (93 dans un lot témoin). Le rapport est de 1,91 : la dose de doublement pour le fœtus est donc de 3 à 4 r, soit le 1/10 de la dose de doublement pour un adulte.

(1) W.M. Court-Brown and R. Doll, 1957 : Leukemia and aplastic anaemia in patients irradiated for ankylosing spondylitis. Special Report Series, N°. 295, Medical Research Council, London.

(2) C.L. Stewart, L.H. Hempelmann, L.M. Fuller, 1956. Malignant disease in childhood and diagnostic irradiation in utero. Lancet 270 - 447.

D'après Buchet, ces résultats concorderaient avec ceux d'une autre enquête faite par Paterson aux U.S.A. (Louisiane) :

- sur 70 enfants morts avant l'âge de dix ans de leucémie : 27, 3 % avaient été irradiés in utero,

- sur 70 enfants morts avant l'âge de dix ans d'affection maligne, 28,5 % avaient été irradiés in utero,

- sur un groupe témoin de 293, 18,4 % seulement avaient été irradiés.

B = LES DONNEES DE L'EXPERIMENTATION :

1°) - SUR LE TISSU HEMATOPOIETIQUE FOETAL DE LA SOURIS :

= Le thymus, la rate et la moëlle osseuse n'acquièrent que tardivement leur fonction sanguiformatrice. Lorsque celle-ci est atteinte, les résultats sont analogues à ceux des adultes.

= Le foie (mature le 12ème jour) est le principal organe hématopoïétique foetal. Les lésions sont moins graves et se réparent plus vite que chez l'adulte aux mêmes doses. (J.F Duplan, Laboratoire de l'Inst. du Radium).

2°) - EXPERIENCES DE MAISIN ET MALDAGUE (Institut du Cancer, Louvain)

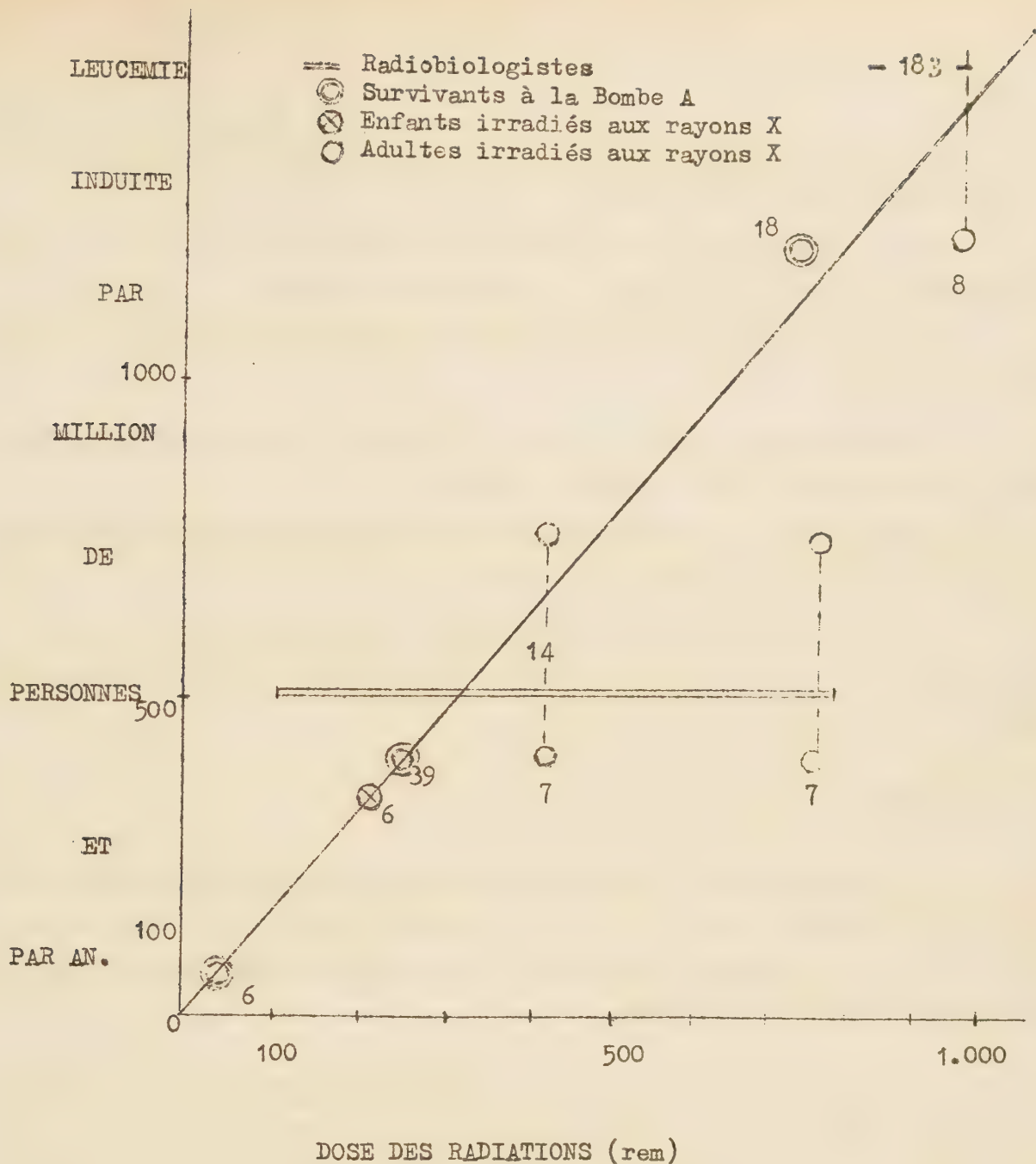
- Ces auteurs provoquent expérimentalement un cancer chez le rat blanc.

- 1.237 animaux irradiés, 100 cancers (incidence : 8,08 %)

- Protocole très complexe : irradiation à 600, 850, 1.000, 2.000 r. 300 r sur les femelles gestantes. Sans protection, avec protection par écran de plomb ou chimique, avec greffe de moëlle, etc.

- En ce qui concerne les régions protégées, nous retiendrons celle du foie et de la rate.

- Voici le résumé partiel de leurs résultats :



RELATION ENTRE L'INCIDENCE ANNUELLE DE LA LEUCEMIE INDUITE DE L'HOMME
ET LES DOSES DES RADIATIONS.

(LEWIS, E.B. 1957. Statement before the Joint Committes on Atomic Energy, 85 th Congress, 1st session. "The Nature of Radioactive Fall-out and its Effects on Man, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. pages 955-977.).

1) Cancers produits : Epithéliomas (52 %), Sarcomes (21 %), Epithélio-Sarcomes (3 %), Leucosarcomes (24 %).

2) Une seule dose de rayons X administrée sur l'ensemble du corps ou une région limitée élève le taux d'incidence de cancers.

3) Il semble bien exister un seuil de cancérisation propre à chaque variété de tissu.

4) La période de latence dans l'apparition des cancers après une seule dose de rayons X est toujours longue.

5) Les méthodes de radioprotection quelle qu'elle soit, n'ont aucun effet de protection, du moins pas absolu.

6) La protection de l'abdomen réduit de moitié l'incidence. Kaplan avait montré que la protection du foie et de la rate ne modifiait pas l'incidence des leucémies, chez la souris.

C - COURBE DE LEWIS :

Collationnant les résultats de diverses enquêtes, Lewis constate que les résultats peuvent se placer sur une droite et émet l'hypothèse d'un seuil à 50 r. Il pense que l'incidence des leucémies est liée par une relation simple au carré de la dose.

Conclusion : Tant les données expérimentales que celles de l'observation statistique, nous administrent les preuves indiscutables d'une action cancérigène retardée des radiations ionisantes. L'existence d'une dose-seuil et d'une radiosensibilité tissulaire non uniforme ne peuvent être une preuve suffisante qu'il n'existe pas d'effet cumulatif pour les doses inférieures à la dose-seuil apparente : il semble au contraire que l'on ne saurait expliquer l'effet retardé des irradiations sans dommages visibles, sans l'existence d'effets cumulatifs.

Toutes les hypothèses pathogéniques émises jusqu'ici (mutations somatiques, virus exogène placé dans un milieu réceptif, processus immunitaire contrecarrant la formation de ribonucléines "pathologiques", chaînon hormonal,

etc) demeurent impuissantes à nous fournir les données essentielles d'une prophylaxie - voire d'une thérapeutique - étayée. On a eu la sagesse de la rendre efficace. Retenons ce chiffre dû à Morgan : l'accroissement du fardeau somatique, du fait des radiations ionisantes pour une population prise dans son ensemble serait de $7,3 \times 10^{-6} \% / 50 \text{ ans}$.

DISPOSITIONS GENERALES

--

La protection des collectivités contre les dommages possibles des radiations ionisantes, dissipées au cours des activités multiples qui découlent de l'exploitation pacifique de l'énergie atomique, est, par nature, inhérente à l'irradiation permanente de larges couches de population.

Une fois prises, au moment de la création et pendant le fonctionnement des installations nucléaires, les dispositions fondamentales assurant la sécurité immédiate des travailleurs et des collectivités voisines, le rôle essentiel de la prévention est d'éviter ou tout au moins de limiter, pour l'ensemble de la population, les effets retardés que peut engendrer l'accumulation de doses radio-actives absorbées au cours d'une exposition involontaire et inconsciente s'étendant sur toute la vie humaine, de telle sorte que la dose EBR gonadale moyenne/30 ans ne contribue pas à accroître la dose génétique admise pour une population (10 rems).

Le total de ces doses "intégrées" au cours du temps peut provenir :

- de la radio-activité naturelle (rayons cosmiques, roches granitiques, potassium 40, carbone 14, radon, etc...)
- des retombées atmosphériques d'origine expérimentale
- des applications médicales (radio-diagnostic, radiothérapie, isotopes radio-actifs).

- de la pollution radio-active du milieu ambiant, de la nappe phréatique et des aliments contaminés par les déchets expérimentaux et industriels ou par les radio-éléments naturels.

- enfin de certains appareils, utilisés dans la vie courante : télévision, montres lumineuses, jouets, etc

Les effets retardés qu'il faut craindre de voir apparaître après l'absorption répétée de petites doses toujours cumulatives et dont l'action ne comporte pas de seuil, sont de 3 sortes :

- le raccourcissement de la durée de la vie
- l'apparition de cancers et surtout de leucémies

- l'accroissement du pourcentage de tares et un déséquilibre génétique de l'espèce en relation avec un accroissement du taux des mutations soit géniques, soit ponctuelles.

Nous ne disposons pas de moyens de vérifier les conséquences d'une exposition chronique. Cependant certains faits provenant d'irradiés à des doses supérieures aux DMA peuvent nous donner une indication en ce qui concerne les effets sur la durée de vie et l'apparition des leucémies :

- la probabilité de voir évoluer une leucémie est de l'ordre de 7×10^{-6} à 6×10^{-6} par rem/année.
- le raccourcissement de la durée de vie est compris entre 10^{-4} et 7×10^{-4} de vie par rem/année.

Il n'est pas certain que ces relations soient linéaires (K.Z. Morgan). Lorsqu'on se base sur ces données, les radiations ionisantes pourraient faire apparaître chez une collectivité de 100.000 travailleurs en 50 ans :

- 26 à 230 cas de leucémies.
- un raccourcissement de vie équivalent à 54 - 380 vies.

Dans une population de 100.000 habitants, on rencontre :

- 315 cas de leucémies.

Si l'on tient compte que l'irradiation moyenne que reçoit une personne non professionnellement exposée est 100 fois inférieure à celle que peut recevoir un travailleur, on peut s'attendre à voir paraître dans une

population de 100.000 habitants, du fait de l'action des R.I. :

- 2,3 cas de leucémies en 50 ans, ce qui correspond à un accroissement du fardeau somatique de $7,3 \times 10^{-6}\%$ en 50 ans.

En ce qui concerne les possibilités d'accroissement du fardeau génétique, il y a lieu de distinguer deux éventualités :

La stabilité de l'espèce peut être modifiée :

- soit par une augmentation du taux des mutations (allèle mutant dominant avec hétérozygotie, allèle récessif avec homozygotie, tare liée au sexe).

- soit du fait de la prédominance sélective des homozygotes par rapport aux hétérozygotes (Muller) ou inversement (Dobzhansky, Lerner et Wallace).

Dans le premier cas le fardeau génétique peut être accru par les radiations ionisantes, dans le second cela est très douteux.

L'augmentation de fréquence des tares a été prévue en fonction du doublement du taux des mutations :

- L'achondroplasie (mutations léthales dominantes) passerait de 1 à 1,8 pour 10.000 en une génération et cet équilibre se maintiendrait (Mörch).

- L'hémophilie (tare récessive liée au sexe) augmenterait de 30 % en une génération et de 90 % en 6 générations (Penrose).

- Le taux de coefficient intellectuel inférieur à 70 qui est actuellement de 2,3 % serait multiplié par un chiffre de 2 ou 2,9 au bout de quelques générations (Mather). Il s'agit d'une déficience à caractère complexe.

- Le taux des déficiences mentales (oligophrénie phénylpyruvique, idiotie amaurotique familiale, microcéphalie héréditaire) qui est de 1 % (25.000 cas en France) augmenterait de 1 % en une génération. (Medical Research Council - Londres 1956). Il s'agit d'une tare récessive qui apparaît seulement en cas d'homozygotie.

En fait il est probable que ces dommages génétiques seront compensés par ailleurs par l'accroissement de nos moyens sanitaires et de prophylaxie générale qui atténueront les rigueurs de la sélection naturelle.

Dans cette perspective, il serait déraisonnable de vouloir à tout prix "subordonner l'intelligible au vérifiable". D'autant plus que ces risques peuvent être accrus soit en raison d'accidents inattendus parce qu'imprévisibles (en raison de la minutie des précautions prises) de réacteurs, soit en raison d'un accroissement gigantesque de la production énergétique. Il est vrai que dans ces domaines les prévisions sont tantôt purement spéculatives, tantôt très controversées : voici quelques opinions d'experts qualifiés :

"Un réacteur à grande puissance ou une usine de préparation de carburant peuvent être endommagés et détruits accidentellement et dissiper tout ou partie de leurs produits de fission. Les conséquences d'une telle éventualité pourraient être catastrophiques et s'étendre sur de grandes surfaces. On estime que la surface de la zone atteinte pour un réacteur de grande puissance, serait de l'ordre de 1.000 miles carrés ou davantage, (ce qui représente environ 2750 km² c'est à dire la 1/200ème partie du territoire français ou encore la moitié d'un département)" (National Academy of Sciences).

"On peut affirmer que la perte complète de la protection, certainement mortelle pour les opérateurs, ne causerait par elle-même aucun dommage si le réacteur est entouré d'une zone interdite de dimensions raisonnables" (C.R. Mac Cullough - U.S.A.E.C.)

Les prévisions en besoins énergétiques, aux Etats-Unis, indiquent :

- pour 1975 : 10⁸ à 10⁹ kilowatts ("atomiques")
- pour l'an 2.000 : 10⁹ à 10¹⁰ kilowatts.

Les prévisions en ce qui concerne l'Iode 131 et le Krypton 85 qui pourraient être "normalement" déversés dans l'atmosphère, sont les suivantes:

= A l'échelle locale (jusqu'à 160 kms de site)

- Les concentrations en Krypton 85 (période = 10 ans) pourraient être multipliées par 10 ou 100, selon les conditions météorologiques. Nous ne connaissons pas actuellement sa CMA, mais on peut penser que les concentrations qui seront alors atteintes seront encore "acceptables". Cependant la longue période du Krypton favorise son accumulation.

- La concentration en Iode 131 actuellement rencontrée serait multipliée par 10^4 à 10^6 . Malgré sa courte période (8 jours) la déposition par précipitation peut augmenter considérablement ses effets nuisibles.

= A l'échelle universelle ou hémisphérique : la concentration maximum admise pour l'Iode 131 (3×10^{-9} curies/m³) sera atteinte.

Quant aux déchets produits accidentellement, ils pourraient en l'an 2.000 doubler la concentration maximum permise et pourraient contaminer toute l'aire terrestre. (National Academy of Sciences 1956).

Il convient de remarquer que d'importantes mesures d'ordre technologique parviendront vraisemblablement à atténuer ces prévisions.

Comme nous l'avons déjà mentionné, la protection de la population dépend essentiellement :

- des mesures de sécurité prises à l'échelon industriel, tant au moment de la conception des installations qu'au cours de leur fonctionnement : ces mesures permettent de limiter la pollution du milieu environnant. (Normes tertiaires et secondaires).

- de la transpiration radio-active des sols et de l'accumulation des radio-éléments soit par la faune, soit par la flore, enfin de la pollution aquatique (Radioécologie).

Elle est fondée :

- Sur les données de radiobiologie et particulièrement sur celles qui ont trait au rôle de l'Acide désoxyribonucléique dans la production des mutations.

- Sur les données de radio-épidémiologie qui sont étroitement associées aux recherches fondamentales tant en génétique qu'en carcinologie.

Les mesures de sécurité rattachées à l'exploitation elle-même de l'énergie nucléaire, depuis la création des installations jusqu'à l'aménagement des déchets ont abouti à de remarquables résultats :

"il n'y a eu aux Etats-Unis que 3 accidents mortels depuis le début de 1942 et un très petit nombre d'incidents dus aux radiations ionisantes dans l'ensemble des Etats-Unis" (Morgan).

L'aménagement des déchets n'a jusqu'ici donné lieu à aucune dispersion à Hanford par exemple (70 millions de gallons stockés en 1959).

Nous avons vu également que toutes les mesures de contrôle effectuées dans l'environnement tant par l'AEC à Hanford, et à Oak-Ridge, que par certains organismes privés n'avaient jamais montré une pollution dépassant les concentrations maximum admises.

Le problème présent est donc essentiellement de circonscrire l'étendue d'un danger lié à l'absorption indéfiniment répétée de petites doses cumulatives et à effet linéaire par l'ensemble de la population.

Dans ce but, la "Division of Radiological Health" (D.R.H.) du département de la Santé, de l'Education et du Bien-être aux Etats-Unis a récemment établi un vaste programme orienté dans 5 voies différentes :

1 - La Radioécologie : dont le but est :

- la détermination de l'activité des particules radio-actives de l'air,
- la radio-activité des précipitations,
- la radio-activité dans l'environnement,
- la radio-activité du lait,
- la radio-activité de l'eau.

2 - La Radio-épidémiologie :

Les recherches épidémiologiques se proposent essentiellement d'élucider les effets produits dans la population par des doses déterminées de radiations ionisantes et notamment le problème de la "dose-réponse".

3 - La Radiobiologie :

4 - Méthodologie et Instrumentations :

Elle envisage ici de rechercher les meilleures méthodes qui pourraient être employées pour effectuer les mesures de doses absorbées par chaque membre d'une collectivité donnée et étayer ainsi les recherches épidémiologiques.

5 - L'étude de la contamination par les sources médicales :

L'ampleur de ce programme donne la mesure des besoins de la protection contre les radiations ionisantes et surtout de la protection des populations.

CONCLUSION

La protection des collectivités contre les dommages possibles des radiations ionisantes dissipées par les différentes formes d'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire est inhérente :

- à l'irradiation faible mais permanente de larges couches de population,
- au fait que la relation dose-effet ne comporte pas de seuil et que les doses sont cumulatives.

Une fois prises les dispositions fondamentales au moment de la création et pendant le fonctionnement des installations nucléaires - dispositions qui ont abouti à des résultats édifiants : 3 morts depuis 1942 et quelques rares incidents aux U.S.A. - le rôle essentiel de la prévention est, pour l'ensemble de la population, d'éviter l'apparition des effets retardés des radiations ionisantes :

- le raccourcissement de la durée de la vie,
- l'apparition de cancers et de leucémies,
- l'accroissement du fardeau génétique.

Le raccourcissement de la vie est compris entre 10^{-4} et 7×10^{-4} vie par rem/année.

L'accroissement du nombre de leucémies serait de $7 \times 10^{-6}\%$ en 50 a.

L'accroissement du fardeau génétique, du fait des R.I. varierait avec la nature des mutations produites. Les prévisions statistiques sont incertaines du fait des difficultés que présente l'estimation du taux des mutations. Vraisemblablement cet accroissement pourrait être compensé par les progrès de l'Hygiène et de la Médecine qui atténueraient les effets de la sélection naturelle.

Vu, le Président de Thèse :

Professeur DEPARIS

Vu, le Doyen de la Faculté :

Professeur L. BINET

Vu, et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris :

J. SARRAILH

B I B L I O G R A P H I E.

--

Nous avons puisé l'essentiel de notre bibliographie dans les ouvrages ou documents suivants :

- Selected Reading on Atomic Energy. United States Atomic Energy Commission, U.S. Government Printing Office. Washington, 25, D.C.
- Atomic Energy Commission research reports, U.S. Department of Commerce Washington 25, D.C.
- Technical Books Published (1947 - 1959) : sponsored by U.S.A.E.C. Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Washington 25.
- British Medical Book List
- Principles of Nuclear Reactor Engineering by Samuel Glasstone. D. Van Nostrand Company, inc. Princeton, New Jersey.
- Major Activities in the Atomic Energy Programs, U.S.A.E.C., U.S. Government Printing Office, Washington 25, D.C. (Années 1956 et 1959).
- Selected Materials on Radiation Protection Criteria and Standards : their basis and Use. Mai 1960 ; A.E.C., U.S. Government Printing Office Washington 25, D.C.
- The Biological effects of Atomic Radiation, Sumary Reports, National Academy of Sciences, National Research Council, Washington, 1956 et 1960.

- Proceedings of Inter-American Symposium on the Peaceful Application of Nuclear Energy, May 1957, U.S.A.E.C., Technical Information Service Extension, Oak-Ridge, Tennessee.
- Theoretical possibilities and Consequences of Major Accidents in large Nuclear Power Plants, U.S.A.E.C., U.S. Government Printing Office. 1957.
- Biological Cycle of Fission Products Considered from Viewpoint of Marine Organisms : Yoshio Hiyama, Professeur à l'Université de Tokio. (Peaceful Uses of Atomic Energy - United Nations 1956, vol. 13, p. 368).
- The Circulation of Radioactive Isotopes : James R. Arnold and E.A. Martelle (Scientific American, Sept. 1959, p. 85).
- Radiation Exposure to People in the Environs of a Major Production Atomic Energy Plant : J.V. Healy, B.V. Andersen, (A/Conf. 15.P.743 - NSA 12 : 14523). 2ème Conférence de Genève, Sept. 1958.
- Radiation Protection : Carl B. Braestrup, Charles C. Thomas, Bannertone House, 301-327 East Lawrence Avenue, Springfield, Illinois, U.S.A.
- Promesses et Menaces de l'Energie Nucléaire, Charles-Noël Martin. Presses Universitaires de France, 108 Boul. Saint-Germain. 1960.
- Eléments de Radiobiologie appliquée : Buchet et Breitman, Masson, 1960.
- Action des Radiations ionisantes sur l'organisme : Lacassagne et Gricouroff, Masson, 1956.
- Lésions provoquées par les Radiations Ionisantes : J. Delarue et L. Frühling - par Lacassagne, Ad. Dupont, P. Van Canegheim, Civate, Mathé, Jean Bernard, J-F Duplan, M. Errera, J. Masin, P. Maldagne, M. Lamy, J. Frézal, Ch. Gouyou. Masson, 1960.
- Protection contre les Radiations Ionisantes, Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay, Service d'Hygiène Atomique et de Radiopathologie du Commissariat à l'Energie Atomique : cours du 19 Nov. au 14 Déc. 1956. Pergamon Press, 24 Rue des Ecoles - Paris Vème.
- Recommandations Générales relatives à la Protection contre les Radiations Ionisantes : Journal Officiel du 11 Juillet 1957.

- Directives fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des R.I. Presse Médicale 11 Avril 1959.
 - Progrès accomplis et à accomplir dans la Protection contre les Radiations ionisantes : J. Boyer et G. Blancher (Presse Médicale, 28. III. 59).
 - Génétique Médicale : Raymond Turpin, in E.M.C. tome III, Pédiatrie et Première enfance, page 4.140 A B.
 - Comment établir des règles pratiques pour éviter la contamination : F. Duhamel et J.M. Lavie,
 - Données de la surveillance et règles qui en résultent en matière de protection contre les rayonnements : F. Duhamel,
(Documents hors commerce qui nous ont été communiqués).
 - Mécanisme de la rétention des Atomes radioactifs : Dominici et Madame S. Laborde, Compte-Rendu à l'Académie des Sciences, 156. 1913, p. 1107.
 - La Radioactivité, le point de vue de la protection et des Services Sanitaires, : R. Gardel, France-Sélection.
 - Le Génie Atomique, Tome II, Presses Universitaires, 1960.
 - Physique et Microphysique : Louis de Broglie (Albain Michel, 1947)
 - Les Radiations Nucléaires : Marc Lefort (Presses Universitaires de F.)
-



**AGEMP
POLYCOPIE**

8, rue Dante
PARIS - V •

Téléphone : ODÉon 58-90